



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“ESTUDIO DE CORROSIÓN EN ALEACIONES DE  
ALUMINIO CON Y SIN CLADDING TRATADOS  
TÉRMICAMENTE”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO EN MATERIALES**

**PRESENTA**

**GABRIELA ITZEL LÓPEZ JIMÉNEZ**

**DIRIGIDA POR**

**DR. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2019.**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“ESTUDIO DE CORROSIÓN EN ALEACIONES DE  
ALUMINIO CON Y SIN CLADDING TRATADOS  
TÉRMICAMENTE”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

**INGENIERO QUÍMICO EN MATERIALES**

PRESENTA

GABRIELA ITZEL LÓPEZ JIMÉNEZ

DIRIGIDA POR

DR. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ

SINODALES

Dr. ADRIÁN SOSA DOMÍNGUEZ  
DIRECTOR

M. en C. GUSTAVO PEDRAZA ABOYTES  
SINODAL

Dr. JOSE DE JESUS CORONEL HERNANDEZ  
SINODAL

Q.M. ARMANDO GRANADOS RANGEL  
SINODAL

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
RESUMEN	
1. ANTECEDENTES	1
1.1 Proceso Electroquímico de Corrosión	1
1.2 Tipos de Corrosión	2
1.2.1 Corrosión seca	2
1.2.2 Corrosión húmeda	3
1.3 Aluminio y sus aleaciones	4
1.4 Tratamientos térmicos en aluminio y sus aleaciones	6
1.5 Cladding en aluminio	10
1.6 Técnicas electroquímicas	11
1.6.1 Polarización lineal (LP, por sus siglas en inglés)	12
1.6.2 Polarización cíclica potenciodinámica (CPP, por sus siglas en inglés)	13
1.6.3 Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas inglés)	14
2. OBJETIVOS	16
2.1 General	16
2.2 Particulares	16
3. METODOLOGÍA	17
3.1 Materiales	17
3.2 Métodos	17
3.2.1 Preparación de la superficie de las placas de aluminio	16

3.2.2 Pruebas Electroquímicas	17
4. RESULTADOS	20
4.1 Curvas de polarización para el material Al 2024-T3 sin y con cladding	20
4.2 Curvas de polarización potenciodinámicas para el material Al 2024-T3 sin y con cladding	22
4.3 Espectroscopia de impedancia electroquímica para el material Al 2024-T3 sin y con cladding	23
4.4 Curvas de polarización para el material Al 7075-T6 sin y con cladding	25
4.5 Curvas de polarización potenciodinámicas para el material Al 7075-T6 sin y con cladding	27
4.6 Espectroscopía de impedancia electroquímica para el material Al 7075 T6 sin y con cladding	28
5. DISCUSIÓN	31
6. CONCLUSIÓN	36
7. REFERENCIAS	37

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Clasificación de las aleaciones de Aluminio	8
2	Parámetros de corrosión para Al 2024-T3 sin cladding obtenidos de curvas de polarización	21
3	Parámetros de corrosión para Al 2024-T3 con cladding obtenidos de curvas de polarización	22
4	Parámetros de corrosión para Al 2024-T3 sin cladding obtenidos del diagrama de Nyquist	24
5	Parámetros de corrosión para Al 2024-T3 con cladding obtenidos del diagrama de Nyquist	25
6	Parámetros de corrosión para Al 7075-T6 sin cladding obtenidos de curvas de polarización	26
7	Parámetros de corrosión para Al 7075-T6 con cladding obtenidos de curvas de polarización	27
8	Parámetros de corrosión para Al 7075-T6 sin cladding obtenidos del diagrama de Nyquist	29
9	Parámetros de corrosión para Al 7075-T6 con cladding obtenidos del diagrama de Nyquist	30

## INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Diagrama de celda electroquímica	2
2	Modelo simplificado de la corrosión seca	3
3	Modelo simplificado de la corrosión húmeda	4
4	Circuito de una interfase electrificada al paso de una señal senoidal de alta frecuencia	14
5	Placas de aluminio Al 2024-T3 y Al 7075-T6	17
6	Celda Electroquímica utilizada para la realización de las pruebas de corrosión	18
7	Potenciostato marca Bio-Logic modelo VSP-300	18
8	Curvas de polarización lineal para Al 2024-T3 sin cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s	20
9	Curvas de polarización lineal para Al 2024-T3 con cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s	20
10	Curvas de polarización potenciodinámicas para Al 2024-T3 sin cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s	22
11	Curvas de polarización potenciodinámicas para Al 2024-T3 con cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s	23
12	Diagrama de Nyquist para el material Al 2024-T3 sin cladding obtenido a una amplitud de onda sinusoidal de 10 mV	23
13	Diagrama de Nyquist para el material Al 2024-T3 con cladding obtenido a una amplitud de onda sinusoidal de 10 mV	24
14	Circuito eléctrico equivalente	24

15	Curvas de polarización lineal para Al 7075-T6 sin cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s	25
16	Curvas de polarización lineal para Al 7075-T6 con cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s	26
17	Curvas de polarización potenciodinámicas para Al 7075-T6 sin cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s	27
18	Curvas de polarización potenciodinámicas para Al 7075-T6 con cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s	28
19	Diagramas de Nyquist para el material Al 7075-T6 sin cladding obtenidos con una amplitud de onda sinusoidal de 10 mV	28
20	Diagramas de Nyquist para el material Al 7075-T6 con cladding obtenidos con una amplitud de onda sinusoidal de 10 mV	29

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el estudio de corrosión en aleaciones de aluminio 2024 y 7075 con diferente tratamiento térmico como T3 y T6 respectivamente, también se realizó una comparación de la velocidad de corrosión entre las diferentes muestras de aluminio tratadas térmicamente con y sin aplicación de cladding. La velocidad de corrosión fue evaluada con diferentes técnicas electroquímicas, como: polarización lineal, polarización cíclica y espectroscopía de impedancia electroquímica. El electrolito utilizado para realizar las pruebas de corrosión fue cloruro de sodio al 5% (p/v), además se utilizó un contraelectrodo de grafito y un electrodo de referencia de calomel saturado para la realización de las pruebas en la celda electroquímica. Las aleaciones de aluminio mencionadas previamente son especialmente utilizadas con cladding en las estructuras de las aeronaves las cuales son expuestas a diferentes medios corrosivos y se les aplica diferentes tratamientos térmicos dependiendo de su uso, lo anterior debido a que cada tratamiento térmico proporciona diferentes propiedades mecánicas de resistencia, entre ellas elevar la resistencia a la corrosión del aluminio, para así alargar su tiempo de vida. Las velocidades de corrosión de las diferentes aleaciones de aluminio probadas fueron obtenidas con valores promedio de  $5 \times 10^{-3}$  mm por año y de  $0.3 \times 10^{-3}$  mm por año para el aluminio 2024-T3 sin y con cladding y para el aluminio 7075-T6 sin y con cladding con valores de 0.012 mm por año y de 0.009 mm por año respectivamente. Lo anterior indica que la velocidad de corrosión no muestra una diferencia significativa cuando se aplica o no el cladding en las diferentes aleaciones de aluminio, sin embargo si tiene un efecto el tipo de aleación en su aplicación.



## 1. ANTECEDENTES

La corrosión puede definirse como el deterioro de un material o de sus propiedades, debido a la acción del medio ambiente que lo rodea. La causa de que un metal se corroa depende de la cantidad de energía que se le aplica a su mineral base para transformarlo en un metal comercial. La energía calorífica necesaria para extraer los metales de sus compuestos químicos naturales se almacena en el propio metal. Durante el proceso de corrosión, el metal revierte el proceso artificial para regresar a su estado natural. La velocidad de regreso del metal a su estado natural como mineral es directamente proporcional a la cantidad de energía almacenada por él mismo. La cantidad de energía que se requiere y almacena varía de un metal a otro; es relativamente alta en metales como el magnesio, aluminio y hierro; y baja en metales como la plata y el oro; de ahí que la vulnerabilidad a la corrosión es más alta para el magnesio, aluminio y hierro, que para la plata y el oro (Fontana, 1986).

### 1.1 Proceso Electroquímico de Corrosión.

La corrosión metálica puede clasificarse en dos grandes categorías: corrosión seca y corrosión húmeda. La seca tiene lugar con la ausencia de una etapa líquida, o abajo del punto de humedad del ambiente. En este caso, el metal reacciona con los vapores de gases naturales, usualmente a altas temperaturas, formando óxidos secos o escamas (Ávila y Genescá, 1986).

En la corrosión húmeda, el metal reacciona con soluciones acuosas. La corrosión por humedad es la causa de la mayor cantidad del deterioro de materiales. Se ha establecido perfectamente que la corrosión húmeda es regularmente una reacción electroquímica. En la Figura 1 se presentan los elementos que forman la celda electroquímica. La reacción electroquímica se define como la reacción química que requiere de transferencia de electrones o que requiere de un proceso de oxidación y reducción (Ávila y Genescá, 1986).

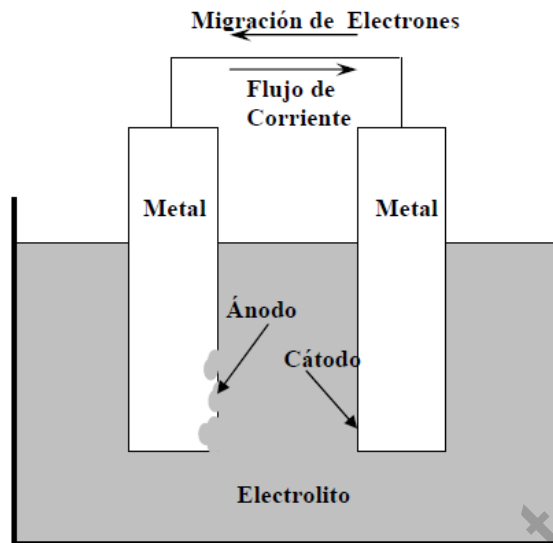


Figura 1. Diagrama de celda electroquímica (Ávila y Genescá, 1986).

## 1.2 Tipos de corrosión.

La corrosión se puede realizar de dos maneras. En la primera, el metal se corroe por ataque químico directo, tal como ocurre en la oxidación y deslustro de los metales por acción de gases secos. La segunda es la corrosión electroquímica que requiere la presencia de humedad y de electrolitos, aunque prácticamente toda la corrosión es de naturaleza electroquímica (Morral y col., 2004).

Tradicionalmente se establecen dos procesos básicos de ataques corrosivos atendiendo al medio en el que se producen:

- Corrosión seca
- Corrosión húmeda

### 1.2.1 Corrosión seca.

Tiene lugar cuando el material se encuentra sometido al acción de gases, principalmente a temperaturas elevadas, por lo que no se tiene un electrolito condensado. En primera instancia, la capa externa del material se recubre del producto de la oxidación. Entonces, el proceso de corrosión tiene lugar por difusión, lo que hace que, en general, sea difícil y lento tal como se muestra en la Figura 2 (Gómez y Alcaraz, 2004).

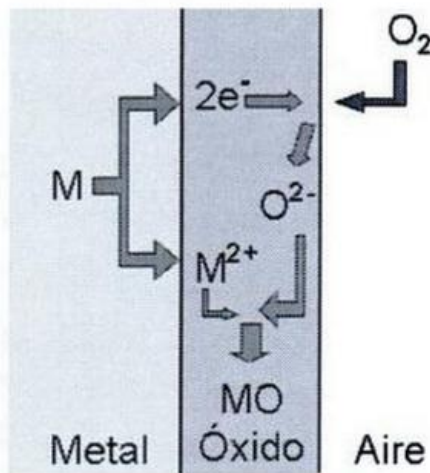


Figura 2. Modelo simplificado de la corrosión seca (Gómez y Alcaraz, 2004).

En la corrosión seca, los óxidos que se forman son de carácter iónico (cationes metálicos y aniones de óxido regularmente distribuidos). La estructura cristalina formada presenta normalmente defectos reticulares (deficiencias iónicas), a través de los cuales se produce la difusión de iones. El crecimiento de la capa de óxido depende del movimiento de iones y electrones, puede asimilarse al paso de una corriente eléctrica (Singh, 2014).

### 1.2.2 Corrosión húmeda.

Este tipo de corrosión se da cuando el material se encuentra en medios acuosos. Se produce normalmente a temperatura ambiente o no muy elevada. En este caso el proceso transcurre mediante un mecanismo electroquímico, lo que significa que se generan en zonas en las que el metal se disuelve (zonas anódicas) y otras en las que permanece inalterado (zonas catódicas), en la Figura 3 se representa un modelo de corrosión húmeda (Hughesa y col., 2010).

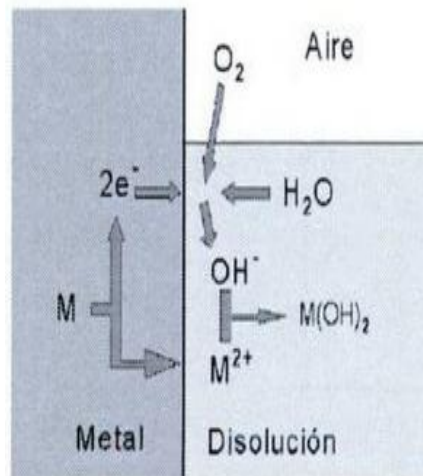


Figura 3. Modelo simplificado de la corrosión húmeda (Gómez y Alcaraz, 2004).

En el metal M, que constituye el ánodo, se produce una reacción de oxidación. Los cationes formados pasan a la disolución mientras que los electrones se desplazan a zonas catódicas. En disoluciones neutras o básicas, la reacción catódica es:



Los cationes metálicos, presentes en la disolución, reaccionan formando hidróxidos metálicos (Feliu y Andrade, 1991).

### 1.3 Aluminio y sus aleaciones.

El aluminio es un material no ferromagnético, y no tóxico. Su densidad es de 2,7 g/cm<sup>3</sup>, tiene buena maleabilidad y capacidad de conformación, alta resistencia a la corrosión, alta conductividad eléctrica y térmica, y no produce chispas. Tiene alta resistencia a la tracción y la del aluminio puro es de aproximadamente 90 MPa (13.000 psi), al ser aleado y tratado térmicamente aumenta su resistencia hasta 690 MPa (100.000 psi). Estas propiedades le han dado ventajas al aluminio de ser un material de ingeniería importante. El aluminio no está naturalmente, ya que solo se encuentra en su forma de óxido (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y se llama comúnmente alúmina (Ramesh, 2012).

Las aleaciones de aluminio se dividen en dos grandes categorías:

- Aleaciones de aluminio para moldeo (casting compositions).
- Aleaciones de aluminio para conformado (wrought compositions).

Una mayor diferenciación en cada una de las categorías arriba mencionadas, se puede lograr teniendo en cuenta los mecanismos involucrados en la obtención de las propiedades mecánicas finales. Los tratamientos térmicos de estas aleaciones se basan en las solubilidades de las fases. Estos tratamientos incluyen el solubilizado, temple y endurecimiento por precipitación. Tanto las aleaciones para colar (as castalloys) como las aleaciones para conformar (wroughtalloys) pueden ser descritas como termotratables (Nunes y col., 2005).

Otro gran número de aleaciones poseen composiciones tales que responden al endurecimiento por trabajado mecánico. Por lo general, luego se les realizan distintos recocidos para promover diversas propiedades mecánicas. Estas aleaciones se llaman aleaciones endurecibles por trabajo mecánico. Algunas aleaciones de fundición son esencialmente no tratables térmicamente y se utilizan sólo en bruto de colada o con alguna condición de modificación térmica no vinculados a los efectos de endurecimiento por solución o precipitación.

En la mayoría de los países se utilizan sistemas numéricos de cuatro dígitos para identificar a las aleaciones de aluminio. El primer dígito indica el grupo de aleación y los dos últimos identifican la aleación de aluminio o indican la pureza del mismo. El segundo dígito indica modificaciones realizadas sobre la aleación original o límites de impurezas. El sistema de designación completo para aleaciones de aluminio para conformado y moldeo se dan en el Cuadro 1 (Nunes y col., 2005).

La utilización del aluminio y sus aleaciones ocupa desde hace más de un cuarto de siglo un lugar destacado en la industria del transporte y la automoción. A principios de la década de los ochentas se pensó que la irrupción de nuevos materiales compuestos metálicos y/o cerámicos podría ser el punto final de la expansión del aluminio. Sin embargo, en los últimos años se está asistiendo a un progresivo incremento tanto en el empleo de este tipo de aleaciones como en la búsqueda de otras nuevas con mejores propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión.

Gracias a la baja densidad de las aleaciones de aluminio se pueden fabricar vehículos más ligeros, aleaciones como la 7075 Al-Zn-Mg-Cu de amplia utilización en la aeronáutica lo que lleva a una serie de ventajas adicionales, como la reducción de peso, reducir el consumo de carburantes, más incluso que el propio diseño aerodinámico. Los científicos dirigiendo sus esfuerzos hacia la obtención de aleaciones de aluminio de menor densidad y mayor resistencia mecánica, dieron como resultado la primera aleación de Al-Li con propiedades mecánicas comparables a la aleación 2024 (Al-Cu-Mg), estas aleaciones presentarían como ventaja adicional el que su proceso de fabricación fuera prácticamente el mismo que el de las aleaciones convencionales (Badía, 1981).

#### 1.4 Tratamientos térmicos en aluminio y sus aleaciones.

El aluminio es una metal que tiene propiedades mecánicas bajas por lo que, para mejorarlas, se tiene que alea con otros elementos. El aumento en resistencia después de alearlo, se obtiene por medio de los procesos de tratamiento térmico o por la deformación mecánica (Xu y col., 2011).

El tratamiento térmico es cualquier operación de enfriamiento o calentamiento que sea desarrollada con el propósito de cambiar las propiedades mecánicas, estructura metalúrgica o el estado de esfuerzos residuales en un producto metálico. La función de un tratamiento térmico es desarrollar un balance deseado de propiedades mecánicas requeridas para su servicio en forma consistente. Sin embargo cuando se aplica un tratamiento térmico a aluminios, se restringe a la operación específica empleada para incrementar la resistencia mecánica y la dureza en aleaciones de aluminio forjado o vaciado por medio del envejecido o endurecimiento por precipitación (Arai y col., 2005).

A diferencia de los aceros, los tratamientos térmicos en el aluminio, pueden incluir procesos de deformación, entre estos tratamientos está: el recocido, disolución, temple y envejecimiento o revenido. No obstante, no todos estos procesos pueden utilizarse en todos los tipos de aluminio, debido a que no responden a los tratamientos térmicos de endurecimiento.

La nomenclatura para cada tipo de tratamiento aplicado, se codifica también bajo ANSI H35.1-1988 mediante una T seguida de un número que indica las secuencias específicas del proceso.

Recocido (-O): es un proceso que, utilizando una temperatura y unos tiempos de enfriamiento controlados, permite reducir la dureza del aluminio y lo prepara para el proceso de disolución y posterior envejecimiento. Existen dos tipos de recocido: parcial y total, en el primero, el proceso se realiza a menor temperatura y el enfriamiento es más rápido, mientras que el recocido total requiere de un enfriamiento controlado en el horno.

En ambos casos hay reducción de la dureza y de las propiedades mecánicas, pero en el proceso parcial, se eliminan tensiones y su efecto es menor en el material, que en el caso del recocido total. A un material recocido se le nombra o codifica con un (-O) al final del tipo de aleación (Molera, 1996).

Disolución y temple (-W): Los procesos de disolución de una aleación de aluminio están estrechamente relacionados con el calentamiento y enfriamiento del material, el primer paso es la disolución, que por lo regular se lleva a cabo en un horno de sales o de atmósfera a una temperatura de 495 °C durante el tiempo necesario para que se diluyan los precipitados. Una vez finalizado este procedimiento, se efectúa un “temple”, en el cual se enfría bruscamente la aleación en agua o en un quenchant (polímero a base de agua) a temperatura ambiente. La diferencia entre un medio u otro consiste en que el agua permite un enfriado más drástico pero puede llegar a deformar el material. El quenchant, por su parte, elimina la energía del material no tan drásticamente, pero si evita que el material se deforme.

El uso de un medio de otro depende pues del tipo de aleación y geometría de la pieza. Vale anotar que el proceso de disolución y temple se designa mediante una -W (Aral y col., 2005).

Cuadro 1. Clasificación de las aleaciones de Aluminio modificado de: (Nunes y col., 2005).

<b>Sistema de designación de aleaciones de aluminio</b>	
Tipo de aleación	Designación
<b>Aleaciones forjadas</b>	
99.00%(min) Aluminio	1XXX
Cobre	2XXX
Manganeso	3XXX
Silicio	4XXX
Magnesio	5XXX
Magnesio y Silicio	6XXX
Zinc	7XXX
Otros	8XXX
<b>Fundiciones aleadas</b>	
99.00%(min) Aluminio	1XX-X
Cobre	2XX-X
Silicio con cobre y/o magnesio	3XX-X
Silicio	4XX-X
Magnesio	5XX-X
Zinc	7XX-X
Estaño	8XX-X
Otros	9XX-X

Envejecimiento (-Tx): También conocido como revenido o maduración, es un proceso que puede ocurrir a temperatura ambiente (envejecimiento natural) o a temperaturas en el orden de los 120 °C (envejecimiento artificial), en donde, de manera controlada, se produce la formación de precipitados, bien distribuidos y con morfología controlada. Este proceso es el encargado de dar la resistencia final y la dureza requerida (Arai y col., 2005).



T1: Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión y maduración. Significa que la pieza ha pasado por un proceso previo de extrusión a una temperatura de 600 °C, aproximadamente. Inmediatamente la barra de aluminio es extruida a dicha temperatura, se mete en un medio de agua fría o en quenchant, es decir se realiza un proceso de temple (-W). Luego la barra de aluminio es expuesta a maduración natural o envejecimiento por un periodo de 96 horas, tiempo en el cual la pieza adquiere su máxima dureza y queda designada mediante la condición T1. El tipo de tratamiento T1 se utiliza comúnmente en las aleaciones de la serie 2xxx.

T2: Tratamiento de temple desde la temperatura de extrusión y maduración natural. Se realiza el mismo proceso de extrusión anterior y se templea en agua o en quenchant. Posteriormente, se le aplica a la barra de aluminio un proceso de deformación en frío también conocido como acritud (a través de rodillos por ejemplo.), con el fin reducir su diámetro. Luego la pieza es dejada al aire para que envejezca y aumente su dureza. A medida que pasa el tiempo, la dureza aumenta progresivamente.

T3: Tratamiento térmico de solución, temple, acritud y maduración natural. Generalmente, las piezas de aluminio en condición T3 pertenecen a la serie 2xxx y son muy utilizadas en Colombia. El proceso consiste en que el material ya no es extruido, sino que se encuentra en condición de recocido (-O), luego se realiza el mecanizado, es decir se da la forma a la pieza y posteriormente se envía a tratamiento térmico de solución a temperatura de 495 °C. Posteriormente, se lleva a cabo el temple en un medio de agua o quenchant y luego el proceso de acritud para reducir su área. Una vez realizados estos procesos, la pieza es sometida a maduración natural para que adquiera la dureza máxima (Aydi y col., 2015).

T4: Tratamiento de solución, temple y maduración natural. Como se mencionó en el anterior proceso, el tratamiento térmico T4 es similar al T3, con la diferencia que dentro de sus etapas, no se lleva a cabo el proceso de acritud o deformación en frío. Es decir, luego que la pieza fue sometida a disolución y temple, se deja a temperatura ambiente para que adquiera su dureza final.

T5: Tratamiento desde temperatura de extrusión y maduración artificial. Este tipo de tratamiento requiere extrusión y posterior temple. Luego y a diferencia del T1, requiere de maduración artificial por medio de un horno a temperatura de 120 °C (la temperatura exacta depende de cada aleación) durante el tiempo necesario para que adquiera dureza (Aydi y col., 2015).

T6: Tratamiento de solución, temple y maduración artificial. Requiere de un proceso de disolución, temple y maduración artificial.

T7: Tratamiento térmico de solución, temple y sobre-maduración estabilizado: Requiere de los mismos procesos de disolución y temple del T3 y T4, la diferencia consiste en que en ese tipo de tratamiento se le debe aplicar a la pieza un sobre-envejecimiento. Dicho proceso se realiza volviendo a envejecer el material a temperatura de 175 °C.

T8: Tratamiento de solución, temple acritud y maduración artificial. Requiere los mismos procesos de disolución, temple, acritud, pero a diferencia del T3, se realiza una maduración artificial (en horno) para adquirir la dureza máxima en el material.

T9: Tratamiento de solución, temple maduración artificial y acritud. Es el mismo tratamiento del T8, pero el proceso de deformación en frío o acritud se realiza después de la maduración o endurecimiento artificial. Estos cambios aunque hipotéticamente deberían ser similares, generan cambios en la resistencia de la tensión del material.

T10: Tratamiento de temple desde temperatura de extrusión, acritud y maduración artificial. Es similar el tratamiento T2, la diferencia consiste en que se realiza maduración artificial (Arai y col., 2005).

### 1.5 Cladding en aluminio.

El uso de la tecnología de claddings sirve para la protección de la corrosión de estructuras de aeronaves hechas de aleaciones de aluminio. Una combinación del material se acomoda de modo que el cladding es anódica (potencial electroquímico inferior) en comparación con el núcleo. Cuando el producto revestido de Al se expone a un ambiente corrosivo y la corrosión comienza, la disolución de metal (reacciones anódicas) se produce en el cladding y la reducción de oxígeno u otros

iones (reacciones catódicas) en el núcleo hace que los electrones fluyan desde el cladding anódico a través de los metales hasta el núcleo catódico. Por lo tanto, el cladding tiende a disolverse preferentemente, protegiendo así el núcleo electroquímicamente. El cladding a doble cara tiene generalmente un espesor de 2,5% del espesor total de la lámina para calibres mayores que 1,57 mm. Sin embargo, una capa de cladding de aluminio puro puede reducir sensiblemente la resistencia a la fatiga de las aleaciones de aluminio tanto como el 60%. Es posible que durante las pruebas de resistencia a la fatiga en sustratos de aleaciones de aluminio se deformen elásticamente bajo tensión cíclica, mientras que la capa de cladding se deforma plásticamente con cada inversión de la carga. Si la capa del cladding se supone no lleva ninguna carga, que representa una pérdida del 5% en el espesor y corresponde a una tasa de crecimiento de la grieta 30 a 40% más rápido. El espesor de la capa de cladding también disminuye la resistencia a la tracción estática debido a la capacidad de carga reducida (De Rose, 2013).

#### 1.6 Técnicas electroquímicas.

Muchos fenómenos de corrosión se pueden explicar en términos de reacciones electroquímicas. Una forma de estudiar dichos fenómenos es mediante técnicas electroquímicas. Las mediciones de la relación corriente-potencial son bajo condiciones controladas que pueden producir información sobre las tasas de corrosión, recubrimientos y películas, pasividad, y otros datos importantes.

La caracterización de una muestra de metal se hace mediante el potencial de la muestra que se escanea lentamente en la dirección de sentido positivo y por lo tanto actúa como un ánodo tal que corroe o forma una capa óxido. Estas mediciones se utilizan para determinar características de corrosión de muestras de metal en solución acuosa. Una medición de corriente-potencial completa de un espécimen se puede medir en unas pocas horas o, en algunos casos, unos pocos minutos (Egnos y Scribner, 2003).

### 1.6.1 Polarización lineal (LP, por sus siglas en inglés).

La técnica LP consiste en una exploración del potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ). Se utiliza para determinar resistencia a la polarización, corriente de corrosión y los parámetros de Tafel. Es la única técnica de control de corrosión que permite a las tasas de corrosión medirse directamente en tiempo real. Aunque limita a los líquidos electrolíticamente conductores, el tiempo de respuesta y la calidad de los datos de esta técnica hacen que sea claramente superior, en su caso, en comparación a todas las otras formas de monitoreo de corrosión. La polarización lineal es particularmente útil como un método para identificar rápidamente los trastornos de corrosión e iniciar medidas correctivas, prolongando así la vida del metal y reducir al mínimo el tiempo de inactividad no programado. La técnica se utiliza para el efecto máximo, cuando se instala como un sistema de monitorización continua (Khatak y Raj, 2002).

Una curva de polarización se representa por el metal en el ambiente corrosivo. Cuando se obtiene la curva de polarización, las curvas anódicas y catódicas de polarización en la región de Tafel (región de fuerte polarización) se extrapolan al circuito abierto, o potencial de corrosión. La velocidad de corrosión se determina por la intersección entre las líneas rectas de Tafel y la línea horizontal de potencial de corrosión. El principal error con la extrapolación de Tafel es el efecto de la polarización por concentración introducida cuando la corriente aplicada es grande. La base teórica de este método sólo es válida para los sistemas de corrosión con un control electroquímico. Si la corriente aplicada es significativa, algunos sistemas de corrosión pueden venir bajo el control del transporte de masa. Esto hará que sea muy difícil definir la región de Tafel de la curva de polarización, introduciendo errores en el proceso de extrapolación. La extrapolación de Tafel no es aplicable en medios altamente resistivos: por ejemplo, ácido acético glacial (Kouril y col., 2006; Baboian, 2005; Fabbri y col., 2013; Sandoval y col., 2014).

Gráficamente las pendientes se pueden determinar mediante el trazo de una línea tangente a cada una de las curvas de polarización. De acuerdo con este método se puede obtener la  $i_{\text{corr}}$  extrapolando cualquiera de las rectas de Tafel hasta el valor de  $E_{\text{corr}}$ . (Khatak y Raj, 2002).

### 1.6.2 Polarización cíclica potenciodinámica (CPP, por sus siglas en inglés).

CPP es una técnica a la corrosión por picadura utilizado para evaluar la susceptibilidad y repasivación del potencial de un material. Se basa en un análisis potenciodinámico, que mide el potencial de picadura, potencial de corrosión, potencial repasivación y la velocidad de corrosión (Hengquan y col., 2011).

En esta prueba, el análisis de polarización cíclica se realiza a una velocidad de barrido de tensión fija. Particularmente la técnica se centra en dos aspectos de la conducta de polarización cíclica. El primero es el potencial en el que la corriente anódica aumenta significativamente con el potencial aplicado (potencial de ruptura). En general, cuanto más noble sea el potencial obtenido, a una velocidad de exploración fija, es menos susceptible la aleación a la iniciación de ataque localizado. La segunda característica de gran interés es el potencial al que se haya completado el ciclo de polarización inversa de exploración. En general, una vez iniciada, la corrosión localizada puede propagarse sólo a un cierto potencial más positivo que el potencial al que se completa el ciclo (cuando se determina a una velocidad de barrido fijo). En otras palabras la repasivación se producirá a potenciales más negativos, incluso después de la iniciación localizada de corrosión. Por lo tanto, el potencial más positivo en el que se completa el ciclo, mientras que en el potencial menos probable la corrosión localizada se propagará. Este potencial se conoce como el potencial de protección (Baboian y Dean, 1990).

El potencial del electrodo se escanea a una velocidad fija. La solución de ensayo o electrolito debe estar lo suficientemente purgada para eliminar el oxígeno antes de entrar en contacto con el espécimen. La celda electroquímica contiene el electrodo de trabajo (del metal en estudio), un electrodo de referencia y un contraelectrodo. El potencial es escaneado en la dirección positiva a partir del potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) a una velocidad de barrido, una corriente continua y se recodifica por el potencióstato. El potencial de ruptura, que marca el inicio de la corrosión localizada es donde se observa un rápido aumento de la corriente. Cuando la corriente llega a 5 mA, la dirección de exploración potencial se invierte, y el potencial aplicado se reduce hasta que el ciclo de histéresis se cierra o hasta que se alcanza el potencial de corrosión. Los resultados se representan como  $E - \log I$  (Yang, 2008).

1.6.3 Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés). La técnica EIS permite deducir el comportamiento de la interfaz metal-solución, ofreciendo una visión completa de los fenómenos corrosivos que tienen lugar (Perez, 2019).

Se basa en el uso de una señal de corriente alterna (CA) que es aplicada a un electrodo y determinando la respuesta correspondiente, la corriente eléctrica tiene como una ventaja ser función del tiempo y de la frecuencia, cuando se aplican las frecuencias, la onda de tipo senoidal es tan rápida que circula a través de un medio como si estuviera en un corto circuito (Perez, 2019).

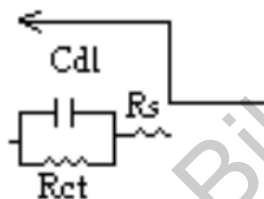


Figura 4. Circuito de una interfase electrificada al paso de una señal senoidal de alta frecuencia (Pérez, 2019).

De acuerdo a la Figura 4, la señal circula a través de la resistencia del electrolito ( $R_s$ ) y del capacitor ( $C_{dl}$ ) registrándose así una resistencia a la transferencia de carga ( $R_{ct}$ ).

La impedancia ( $Z$ ) es una oposición al paso de la señal eléctrica, describe la resistencia eléctrica ( $R$ ), utilizada en circuitos de corriente alterna (CA). En el circuito de corriente directa (CD) la relación entre la corriente ( $I$ ) y el potencial ( $E$ ), descrita por la ley de Ohm es:

$$R = \frac{E}{I}$$

Donde  $E$  en volts,  $I$  en amperes y  $R$  en ohms, En el caso de una señal alterna:

$$Z = \frac{E}{I}$$

Z representa la impedancia con unidades de ohm. Cuando el ángulo de fase toma valores cercanos a cero significa que Z es una resistencia, si se disminuye la frecuencia, el capacitador tarda más en que pase el flujo de corriente y sufrirá una caída de potencial (Mendoza y col.,2002).

Dirección General de Bibliotecas UAQ

## **2. OBJETIVOS**

### 2.1 General.

Estudiar la corrosión en aleaciones de aluminio utilizando Polarización Lineal (LP), Polarización cíclica (CPP) y Espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS).

### 2.2 Específicos.

- Realizar el estudio de corrosión en aleaciones de aluminio con diferentes tratamientos térmicos.
- Evaluar la velocidad de corrosión en aleaciones de aluminio con y sin cladding.



### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Materiales.

Para el estudio de la corrosión se emplearon piezas de diferentes aleaciones de aluminio, Al 2024-T3 y Al 7075-T6 con y sin cladding las cuales pueden observarse en la Figura 5.



Figura 5. Placas de aluminio 2024-T3 y 7075-T6

#### 3.2 Métodos.

##### 3.2.1 Preparación de la superficie de las placas de aluminio.

Se realizó la limpieza mecánica de las placas de aluminio 2024 y 7075 sin y con cladding y con el tratamiento térmico respectivo. Las cuales fueron desbastadas con papel lija del número 800, posteriormente se pulieron utilizando alúmina 0.3  $\mu\text{m}$  y 0.05  $\mu\text{m}$  para favorecer el proceso y obtener un mejor acabado.

##### 3.2.2 Pruebas electroquímicas.

Se montó una celda electroquímica para llevar a cabo las pruebas de corrosión la cual se puede observar en la Figura 6, la cual contaba con un electrodo de trabajo (placas de aluminio), Contraelectrodo (placa de grafito) y electrodo de referencia (Electrodo de calomel saturado, ECS). La solución de prueba fue un electrolito de NaCl al 5%. Posteriormente para la obtención de las mediciones la celda

electroquímica se conectó a un Galvanostato/Potenciostato marca Bio-logic modelo VSP-300 (Figura 7).



Figura 6. Celda Electroquímica utilizada para la realización de las pruebas de corrosión.



Figura 7. Potenciostato marca Bio- Logic modelo VSP-300.

Los parámetros que se utilizaron en la técnica LP fueron una velocidad de barrido de 0.166 mV/s, un barrido de potencial en sentido anódico hasta 0.025 V vs  $E_{oc}$  (potencial a circuito abierto) y un barrido de potencial en sentido catódico hasta -0.025 V vs  $E_{oc}$ . Los parámetros que se utilizaron para la aplicación de la técnica CPP, velocidad de barrido de 10 mV/s, un barrido de potencial en sentido anódico hasta 0.5 V vs  $E_{oc}$  y un barrido de potencial en sentido catódico hasta -0.1 V vs  $E_{oc}$ . Para la técnica de EIS los parámetros utilizados fueron; una frecuencia inicial de 1 MHz, frecuencia final de 10 mHz y una amplitud de la onda sinusoidal de 10 mV.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Curvas de polarización para el material Al 2024-T3 sin y con cladding.

En las Figuras 8 y 9, se muestran las curvas de polarización por duplicado obtenidas para el material Al 2024-T3 sin y con cladding respectivamente, utilizando un electrolito de NaCl al 5% y un electrodo de calomel saturado como referencia.

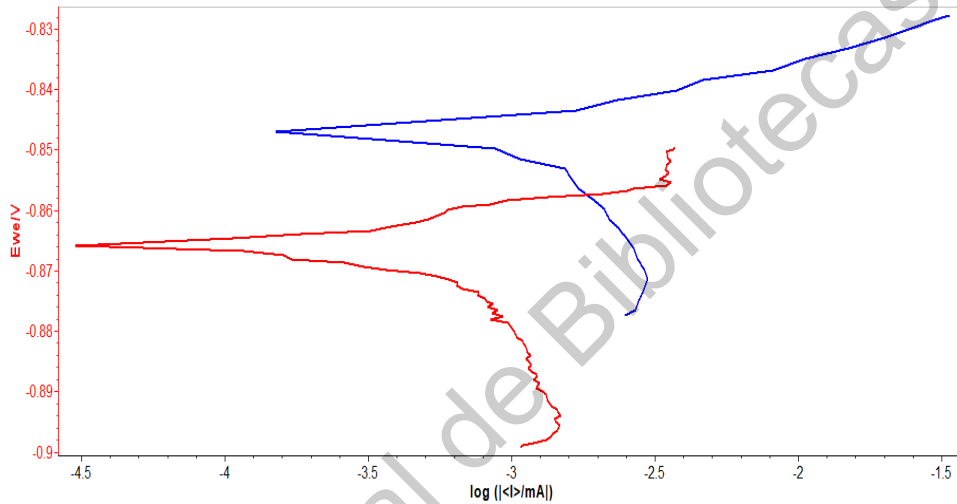


Figura 8. Curvas de polarización lineal para Al 2024-T3 sin cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s.

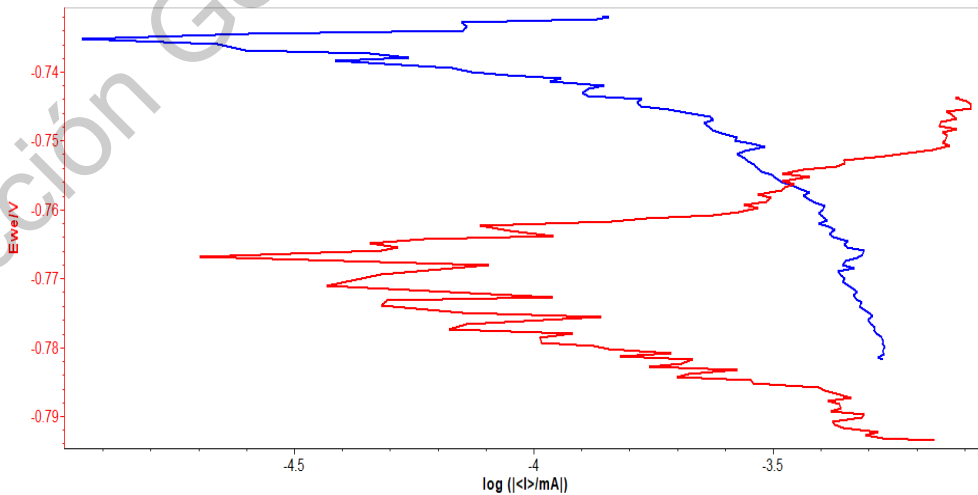


Figura 9. Curvas de polarización lineal para Al 2024-T3 con cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s.

En el Cuadro 2 y 3 se muestran los parámetros de corrosión obtenidos por duplicado obtenidos del tratamiento de las curvas de polarización de las Figuras 8 y 9. A través de las curvas de polarización y aplicando el método de extrapolación Tafel, las pendientes anódicas y catódicas  $\beta_a$  y  $\beta_c$  fueron obtenidas, mismas que se usaron en el cálculo de la velocidad de corrosión también en la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica.

El cálculo de la velocidad de corrosión se realizó por medio de la ecuación de Stearn y Geary (González y col., 1996)

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}$$

Para la obtención del valor de  $R_p$  se realiza por medio de extrapolación de Tafel:

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.303(\beta_a + \beta_c)} \text{ y } R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

La ecuación establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), es decir, la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización. (González y col., 1996).

Cuadro 2. Parámetros de corrosión para Al 2024 -T3 sin cladding obtenidos de curvas de polarización.

	Prueba 1	Prueba 2
<b>E<sub>corr</sub> (mV)</b>	-866.2	-847.3
<b>I<sub>corr</sub> (μA)</b>	0.2	0.8
<b>β<sub>a</sub> (mV)</b>	13.2	11.3
<b>β<sub>c</sub> (mV)</b>	12.9	25.2
<b>Velocidad de Corrosión (mmpy)</b>	2.3x10 <sup>-3</sup>	8.4x10 <sup>-3</sup>

Cuadro 3. Parámetros de corrosión para Al 2024-T3 con cladding obtenidos de curvas de polarización.

	Prueba 1	Prueba 2
$E_{corr}$ (mV)	-735.5	-768.5
$I_{corr}$ (uA)	0.02	0.04
$\beta_a$ (mV)	3.6	13.7
$\beta_c$ (mV)	6.9	20.8
Velocidad de Corrosion (mmpy)	$0.18 \times 10^{-3}$	$0.48 \times 10^{-3}$

4.2. Curvas de polarización potenciodinámicas para el material Al 2024-T3 sin y con cladding.

En las Figuras 10 y 11, se muestran las curvas de polarización potenciodinámicas por duplicado obtenidas para el material Al 2024-T3 sin y con cladding respectivamente, utilizando un electrolito de NaCl al 5% y un electrodo de calomel saturado como referencia.

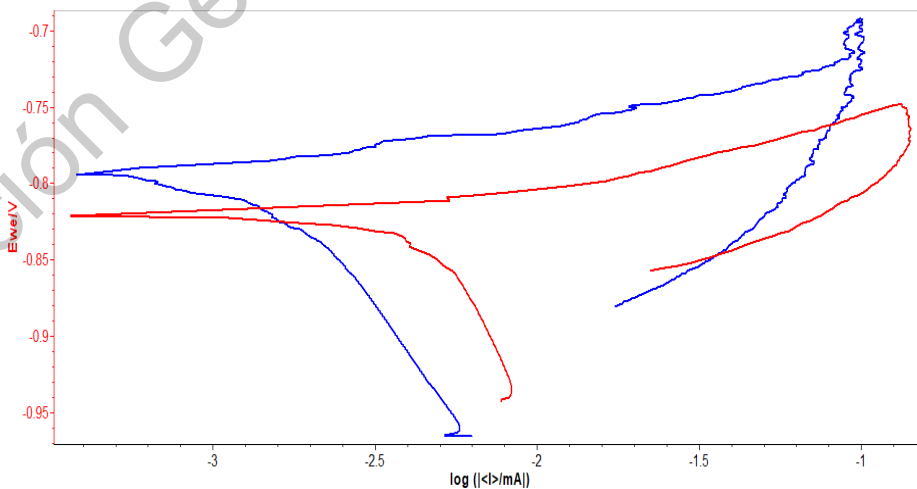


Figura 10. Curvas de polarización potenciodinámicas para Al 2024-T3 sin cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s.

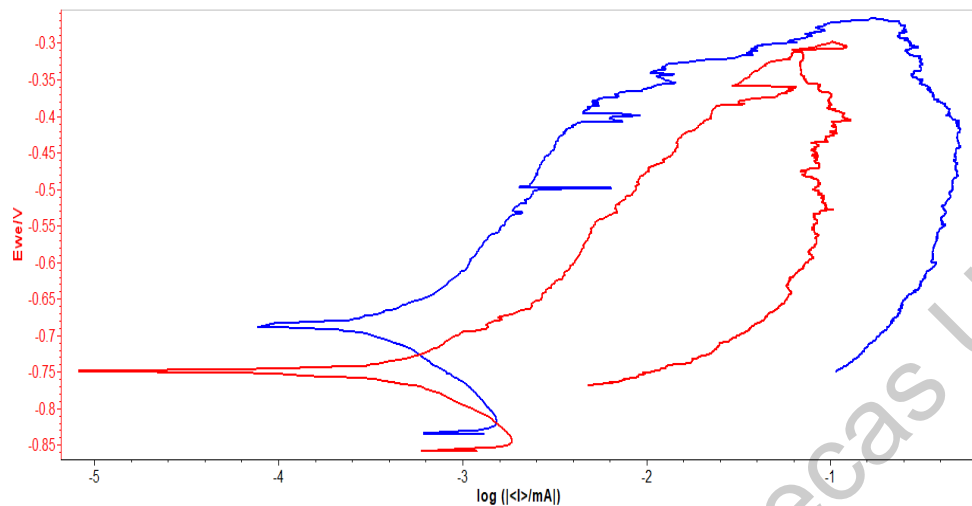


Figura 11. Curvas de polarización potenciodinámicas para Al 2024-T3 con cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s.

#### 4.3. Espectroscopía de impedancia electroquímica para el material Al 2024-T3 sin y con cladding.

En las Figuras 12 y 13, se muestran los diagramas de Nyquist por duplicado para el material Al 2024-T3 sin y con cladding respectivamente, utilizando un electrolito de NaCl al 5% y un electrodo de calomel saturado como referencia.

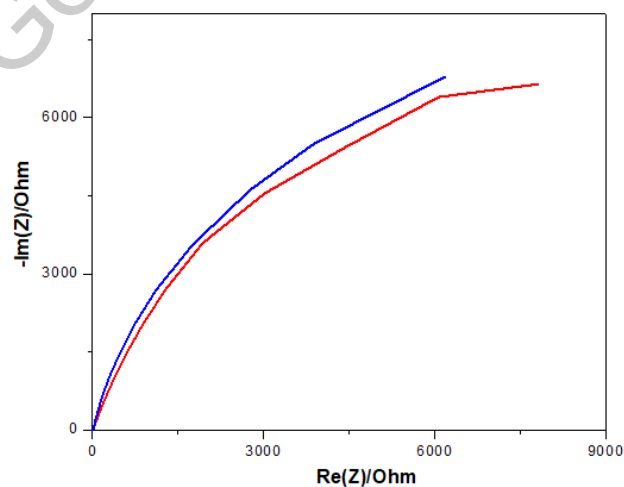


Figura 12. Diagrama de Nyquist para el material Al 2024-T3 sin cladding obtenido con una amplitud de onda sinusoidal de 10 mV.

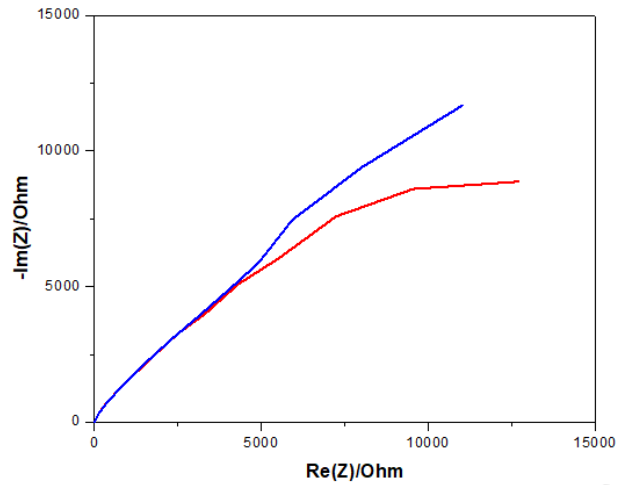


Figura 13. Diagrama de Nyquist para el material Al 2024-T3 con cladding obtenido con una amplitud de onda sinusoidal de 10 mV.

Los parámetros de corrosión de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica fueron obtenidos realizando un ajuste de los datos experimentales con un circuito eléctrico equivalente, el cual se muestra en la Figura 14.

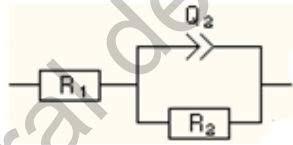


Figura 14. Circuito eléctrico equivalente.

En el Cuadro 4 y 5 se muestran los parámetros de corrosión por duplicado obtenidos del tratamiento de los diagramas de Nyquist de la Figura 12 y 13.

Cuadro 4. Parámetros de corrosión para Al 2024-T3 sin cladding obtenidos del diagrama de Nyquist.

	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>
<b><math>R_{sol}</math> (Ohm/cm<sup>2</sup>)</b>	12.44	11.26
<b>Capacitancia</b>	$7.2 \times 10^{-6}$	$8.1 \times 10^{-6}$
<b>A</b>	0.81	0.86
<b><math>R_{tc}</math> (Ohm/cm<sup>2</sup>)</b>	18682	17177
<b>Velocidad de corrosión (mmpy)</b>	$1.95 \times 10^{-3}$	$2.55 \times 10^{-3}$



Cuadro 5. Parámetros de corrosión para Al 2024-T3 con cladding obtenidos del diagrama de Nyquist.

	Prueba 1	Prueba 2
$R_{sol}$ (Ohm/cm <sup>2</sup> )	13.97	23.90
Capacitancia	$15.6 \times 10^{-6}$	$18.9 \times 10^{-6}$
A	0.68	0.66
$R_{tc}$ (Ohm/cm <sup>2</sup> )	32014	54895
Velocidad de corrosión (mmpy)	$4.2 \times 10^{-4}$	$8.46 \times 10^{-4}$

#### 4.4. Curvas de polarización para el material Al 7075-T6 sin y con cladding.

En las Figuras 15 y 16, se muestran las curvas de polarización por duplicado obtenidas para el material Al 7075-T6 sin y con cladding respectivamente, utilizando un electrolito de NaCl al 5% y un electrodo de calomel saturado como referencia.

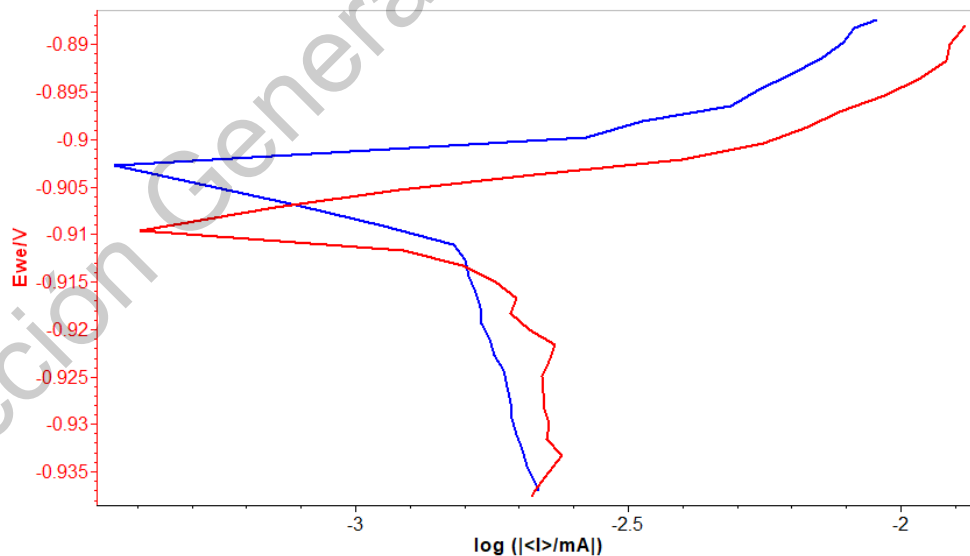


Figura 15. Curvas de polarización lineal para Al 7075-T6 sin cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s.

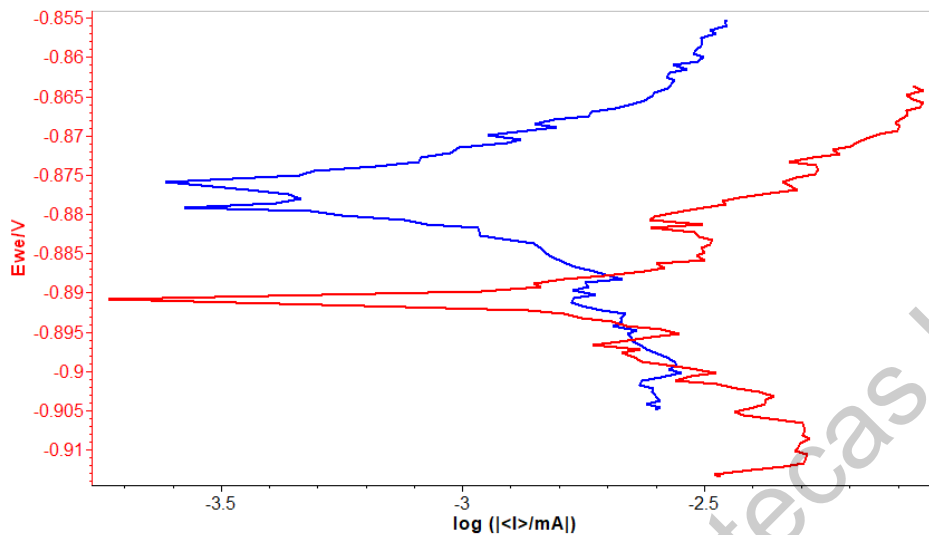


Figura 16. Curvas de polarización lineal para Al 7075-T6 con cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s.

En los Cuadros 6 y 7 se muestran los parámetros de corrosión por duplicado obtenidos del tratamiento de las curvas de polarización de las Figuras 14 y 15. A través de las curvas de polarización y aplicando el método de extrapolación Tafel, las pendientes anódicas y catódicas  $\beta_a$  y  $\beta_c$  fueron obtenidas, mismas que se usaron en el cálculo de la velocidad de corrosión también en la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica.

Cuadro 6. Parámetros de corrosión para Al 7075-T6 sin cladding obtenidos de curvas de polarización.

	Prueba 1	Prueba 2
<b><math>E_{corr}</math> (mV)</b>	-909.68	-904.57
<b><math>I_{corr}</math> (<math>\mu</math>A)</b>	1.36	1.05
<b><math>\beta_a</math> (mV)</b>	17.6	12.3
<b><math>\beta_c</math> (mV)</b>	43.2	62.6
<b>Velocidad de Corrosión (mmpy)</b>	0.014	0.011

Cuadro 7. Parámetros de corrosión para Al 7075-T6 con cladding obtenidos de curvas de polarización.

	Prueba 1	Prueba 2
$E_{corr}$ (mV)	-877.24	-890.66
$I_{corr}$ (uA)	0.64	1.02
$\beta_a$ (mV)	24.6	11.3
$\beta_c$ (mV)	21.3	10.2
Velocidad de Corrosion (mmpy)	$7.01 \times 10^{-3}$	0.011

4.5. Curvas de polarización potenciodinámicas para el material Al 7075-T6 sin y con cladding.

En las Figuras 17 y 18, se muestran las curvas de polarización potenciodinámicas por duplicado obtenidas para el material Al 7075-T6 sin y con cladding respectivamente, utilizando un electrolito de NaCl al 5% y un electrodo de calomel saturado como referencia.

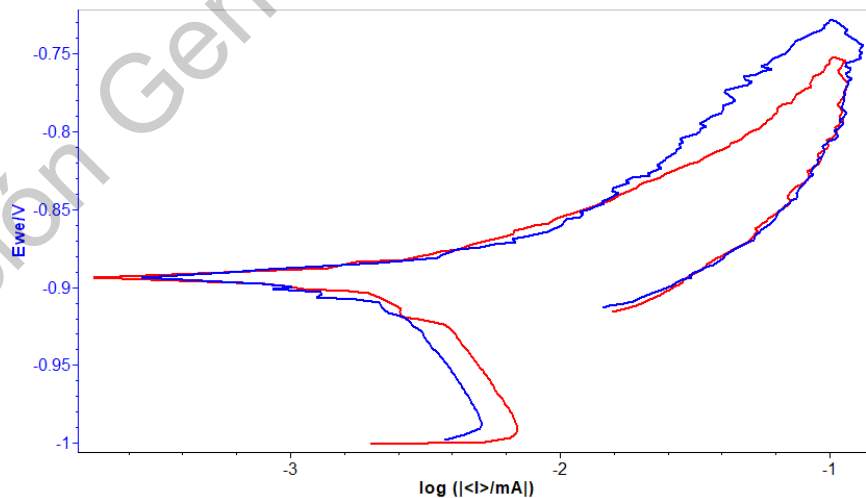


Figura 17. Curvas de polarización potenciodinámicas para Al 7075-T6 sin cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s.

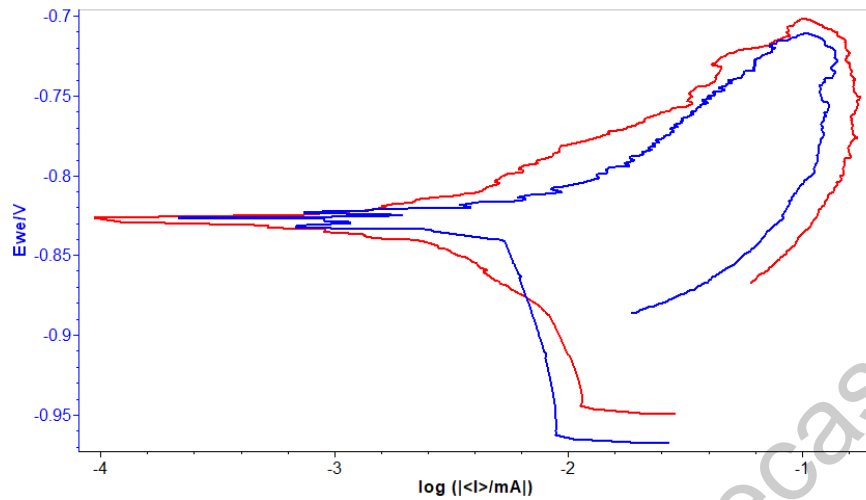


Figura 18. Curvas de polarización potenciodinámicas para Al 7075-T6 con cladding obtenidas a una velocidad de barrido de 0.166 mV/s.

#### 4.6. Espectroscopía de impedancia electroquímica para el material Al 7075 T6 sin y con cladding.

En las Figuras 19 y 20, se muestran los diagramas de Nyquist por duplicado para el material Al 7075-T6 sin y con cladding respectivamente, utilizando un electrolito de NaCl al 5% y un electrodo de calomel saturado como referencia.

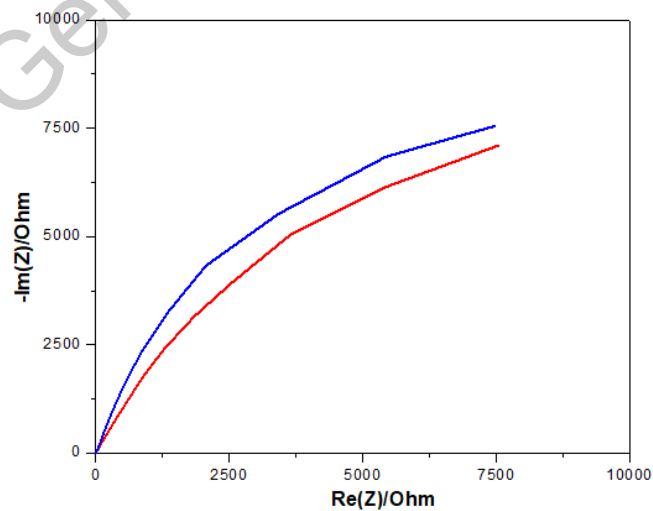


Figura 19. Diagramas de Nyquist para el material Al 7075-T6 sin cladding obtenidos con una amplitud de onda sinusoidal de 10 mV.

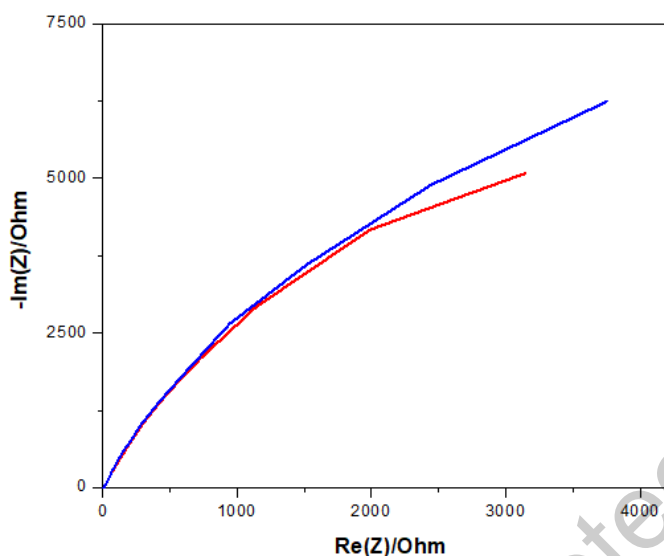


Figura 20. Diagramas de Nyquist para el material Al 7075-T6 con cladding obtenidos con una amplitud de onda sinusoidal de 10 mV.

En el Cuadro 8 y 9 se muestran los parámetros de corrosión por duplicado obtenidos del tratamiento de los diagramas de Nyquist de las Figuras 19 y 20.

Cuadro 8. Parámetros de corrosión para Al 7075-T6 sin cladding obtenidos del diagrama de Nyquist.

	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>
<b><math>R_{sol}</math> (Ohm/cm<sup>2</sup>)</b>	39.4	25.95
<b>Capacitancia</b>	$15.65 \times 10^{-6}$	$12.51 \times 10^{-6}$
<b>A</b>	0.79	0.87
<b><math>R_{tc}</math> (Ohm/cm<sup>2</sup>)</b>	20700	19000
<b>Velocidad de corrosión (mmpy)</b>	$3.37 \times 10^{-3}$	$2.98 \times 10^{-3}$

Cuadro 9. Parámetros de corrosión para Al 7075-T6 con cladding obtenidos del diagrama de Nyquist.

	<b>Prueba 1</b>	<b>Prueba 2</b>
<b>R<sub>sol</sub> (Ohm/cm<sup>2</sup>)</b>	25.06	14.44
<b>Capacitancia</b>	8.69X10 <sup>-6</sup>	8.08X10 <sup>-6</sup>
<b>A</b>	0.90	0.87
<b>R<sub>tc</sub> (Ohm/cm<sup>2</sup>)</b>	15261	21456
<b>Velocidad de corrosión (mmpy)</b>	4.21X10 <sup>-3</sup>	1.29X10 <sup>-3</sup>

Dirección General de Bibliotecas UAO

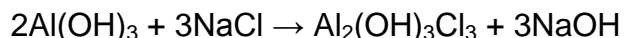
## 5. DISCUSIÓN.

En las Figuras 8 y 9 se muestran las curvas de polarización lineal correspondientes a Al 2024-T3 sin y con cladding respectivamente, para comprender lo que ocurre en la interface del cladding y del sustrato se empleó la técnica electroquímica de polarización lineal y con el fin de calcular la velocidad de corrosión cuando las muestras de aluminio están en contacto con una solución de NaCl al 5%.

Se observó que el Al 2024-T3 con cladding tiene un comportamiento característico en el potencial, el cual se desplaza hacia un potencial menos negativo (más noble) con respecto al Al 2024-T3 sin cladding, este desplazamiento del valor del potencial de corrosión hacia valores menos negativo indica que el cladding es menos susceptible a presentar corrosión.

En el material Al 2024-T3 con cladding en un electrolito de NaCl al 5% podemos observar que la corrosión es uniforme durante todo el proceso en el que se aplicó la técnica electroquímica, este presenta un cambio en la rama anódica en un potencial cercano a -752.0 mV promedio aproximadamente. Este cambio se puede definir como la transición actividad/pasividad del material, ya que aquí se presenta un incremento gradual en la densidad de corriente, hasta llegar a la zona de pasivación en donde se forma una capa pasiva en el sustrato y la densidad de corriente se mantiene constante aumentando el potencial.

En el caso del Al 2024-T3 sin cladding, muestra un desplazamiento hacia potenciales más negativos -856.8 mV promedio aproximadamente indicando mayor susceptibilidad a la corrosión en la solución de prueba. Dicho comportamiento es atribuible al grado de protección de este tipo de material y a los iones Cl<sup>-</sup> provenientes del electrolito de NaCl al 5%, el cual genera trayectorias de menor resistencia al paso del ion Cl<sup>-</sup>, ya que estos iones se difunden y rompen la capa pasiva formando sales solubles que favorecen la disolución del aluminio.



A partir de las curvas de polarización y aplicando el método de extrapolación Tafel, las pendientes anódicas y catódicas  $\beta_a$  y  $\beta_c$  fueron obtenidas, mismas que se usaron en el cálculo de la velocidad de corrosión. En los Cuadros 2 y 3 es posible

observar los valores de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), la pendiente anódica ( $\beta_a$ ), la pendiente catódica ( $\beta_c$ ) y la velocidad de corrosión expresada en mm por año. Los valores de corriente de corrosión más bajos nos indican que el material es menos susceptible a presente un problema de corrosión debido a que el material opone mayor resistencia al paso de corriente, los valores para el Al 2024-T3 con cladding fueron en promedio de  $0.03 \mu A/cm^2$  con respecto a  $0.5 \mu A/cm^2$  para el mismo material pero sin cladding.

La velocidad de corrosión para el material Al 2024-T3 con cladding fue menor con respecto al del material sin cladding con valores de  $3.3 \times 10^{-4}$  mm por año y  $5.3 \times 10^{-3}$  mm por año, respectivamente. Lo anterior indica que el aluminio 2024-T3 con cladding tiene una mayor resistencia al proceso corrosivo debido a la capa protectora que se genera al aplicar aluminio puro sobre su superficie.

Las Figuras 10 y 11 muestran las curvas de polarización potenciodinámicas para el aluminio Al 2024-T3 sin y con cladding respectivamente, en ellas se puede observar que se realizó un barrido más amplio de potencial en sentido anódico para identificar las diferentes zonas de pasividad y rompimientos de las capas pasivas formadas, lo cual es claramente observable más allá de valores de log de la corriente de entre  $-1.5$  mA y  $-1$  mA, con valores de potencial de  $-0.75$  V. En el mismo aluminio con cladding la respuesta de las curvas de polarización potenciodinámicas involucran procesos de pasivación y rompimiento de esas capas en repetidas ocasiones, lo cual es posible que se deba a que al tener una capa de aluminio puro sobre su superficie este material involucre procesos de oxidación y reducción al variar el potencial.

En las Figuras 12 y 13 se muestran los espectros de impedancia electroquímica para el Al 2024-T3 sin y con cladding respectivamente y más específicamente el diagrama de Nyquist de los cuales podemos obtener la resistencia a la transferencia de carga, parámetro que es necesario para el calculo de la velocidad de corrosión del material. En los diagramas de Nyquist se puede observar un bucle correspondiente a un proceso de oxidación en el material probado. La Figura 14



muestra el circuito eléctrico equivalente al proceso electroquímico que se lleva a cabo al poner en contacto el aluminio con una solución de NaCl al 5%.

Los Cuadros 4 y 5 muestran los parámetros de corrosión obtenidos a partir del tratamiento de los Diagramas de Nyquist para el material Al 2024-T3, de donde podemos identificar la resistencia de la solución ( $R_s$ ), la capacitancia de la doble capa electroquímica ( $C_{dl}$ ), el factor ( $a$ ), la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{ct}$ ) y la velocidad de corrosión en unidades de mm por año. La velocidad de corrosión para el Al 2024-T3 sin cladding fue en promedio  $2.3 \times 10^{-3}$  mm por año y de  $6.3 \times 10^{-4}$  mm por año con cladding. En el caso de las velocidades de corrosión obtenidas por la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica se puede observar una diferencia con respecto a las obtenidas por curvas de polarización, sin embargo se sigue observando el mismo comportamiento en cuanto a la mayor resistencia a la corrosión del aluminio con cladding.

En las Figuras 15 y 16 se muestran las curvas de polarización lineal correspondientes al material Al 7075-T6 sin y con cladding respectivamente en el cual se usó la misma técnica electroquímica con una solución de NaCl al 5%, en este caso el Al 7075-T6 con cladding presenta un cambio de la rama anódica en un potencial promedio cercano a  $-883.9$  mV, por el contrario el material Al 7075-T6 sin cladding tiene un desplazamiento más negativo  $-907.1$  mV, lo anterior indica que el aluminio 7075-T6 con cladding presenta una mayor resistencia al proceso corrosivo. En dichos aluminios se presentan comportamientos similares al Al 2024 T3 con y sin cladding ya que se efectuaron las pruebas con mismos parámetros electroquímicos y la misma concentración de la solución de electrolito.

A partir de las curvas de polarización y aplicando el método de extrapolación Tafel, las pendientes anódicas y catódicas  $\beta_a$  y  $\beta_c$  fueron obtenidas, mismas que se usaron en el cálculo de la velocidad de corrosión.

En los Cuadros 6 y 7 es posible observar los valores de potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), la pendiente anódica ( $\beta_a$ ), la pendiente catódica ( $\beta_c$ ) y la velocidad de corrosión expresada en mm por año para el Al 7075-T6. Los valores de corriente de corrosión más bajos nos indican que el material es menos

susceptible a presentar un fenómeno electroquímico de corrosión debido a que el material opone mayor resistencia al paso de corriente, los valores para el Al 7075-T6 sin cladding fueron en promedio de  $1.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  con respecto a  $0.8 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  para el mismo material pero con cladding.

La velocidad de corrosión para el material Al 7075-T6 con cladding fue menor con respecto al del material sin cladding con valores de  $9 \times 10^{-3}$  mm por año y 0.013 mm por año, respectivamente. Lo anterior indica que el aluminio 7075-T6 con cladding tiene una mayor resistencia al proceso corrosivo debido a la capa protectora que se genera al aplicar aluminio puro sobre su superficie.

Las Figuras 17 y 18 se muestran las curvas de polarización potenciodinámicas para el aluminio Al 7075-T6 sin y con cladding respectivamente, en ellas se puede observar que se realizó un barrido más amplio de potencial en sentido anódico para identificar las diferentes zonas de pasividad y rompimientos de las capas pasivas formadas, lo cual es claramente observable más allá de valores de log de la corriente de entre -2 mA y -1 mA para el material sin y con cladding, con valores de potencial de -0.75 V. Como se pudo observar el comportamiento para el aluminio Al-7075-T6 fue muy similar al del Al-2024-T3 en cuanto a la forma de las curvas de polarización potenciodinámicas lo cual da evidencia de la característica de formación de zonas pasivas y su posterior rompimiento, lo anterior hace a estos materiales muy resistentes al proceso corrosivo que pudieran sufrir cuando se encuentran en servicio.

En todos los casos luego de pasar por el potencial de corrosión, la curva pasa a una corriente anódica donde el potencial se incrementa a una velocidad constante e inicia su zona de pasividad hasta llegar al potencial de picado. Una vez alcanzado el potencial de picado, se da la ruptura de la capa pasiva y la curva incrementa su densidad de corriente abruptamente hasta lograr alcanzar la densidad de corriente límite, durante esta última etapa se genera la propagación de los pozos de picado debido a la pérdida de la capa protectora.

En las Figuras 19 y 20 se muestran los espectros de impedancia electroquímica para el Al 7075-T6 sin y con cladding respectivamente y más específicamente el diagrama de Nyquist de los cuales podemos obtener la resistencia a la

transferencia de carga, parámetro que es necesario para el cálculo de la velocidad de corrosión del material. Los Cuadros 8 y 9 muestran los parámetros de corrosión obtenidos a partir del tratamiento de los Diagramas de Nyquist para el material Al 7075-T6, de donde podemos identificar la resistencia de la solución ( $R_s$ ), la capacitancia de la doble capa electroquímica ( $C_{dl}$ ), el factor ( $a$ ), la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{ct}$ ) y la velocidad de corrosión en unidades de mm por año. La velocidad de corrosión para el Al 7075-T6 sin cladding fue en promedio  $3.1 \times 10^{-3}$  mm por año y de  $2.8 \times 10^{-3}$  mm por año con cladding. Al comparar los valores de velocidad de corrosión para el mismo material Al 7075-T6 se puede identificar que son muy parecidos lo cual indica que sin o con la aplicación del cladding se tendría la misma resistencia del material a la corrosión en el medio probado.

Los diagramas de Nyquist obtenidos por espectroscopia de impedancia electroquímica, muestran un semicírculo. El diámetro de éste define la resistencia a la transferencia de carga ( $R_{ct}$ ), que representa la oposición de la interfase al paso de corriente eléctrica. De acuerdo a los diagramas se aprecia que la contribución que prevalece es la activación (transferencia de carga).

Cabe destacar que el Al 2024-T3 con cladding presentó mayor resistencia a la transferencia de carga que todos los estudiados (Al 2024-T3 sin cladding, Al 7075-T6 con y sin cladding), lo que implica mejor resistencia a la corrosión. Sin embargo los resultados de Al 2024-T3 tienen variación considerable entre ellos, por lo que se requieren mayores estudios para asegurar su mejor resistencia.

Es importante señalar los resultados obtenidos por las diferentes técnicas son similares, sin encontrar un beneficio considerable en los materiales al realizar la aplicación de cladding a fin de mejorar su resistencia a la corrosión.

## 6. CONCLUSIÓN.

La realización del presente trabajo de investigación permite concluir que el empleo de las diferentes técnicas electroquímicas muestran resultados similares al obtener el parámetro de la velocidad de corrosión para los materiales probados Al 2024-T3 sin y con cladding y Al 7075-T6 sin y con cladding.

El uso de la técnica electroquímica de curvas de polarización permitió el estudio del proceso de corrosión de los aluminios indicando su potencial de corrosión y con su tratamiento mediante extrapolación de Tafel la obtención de la velocidad de corrosión.

Las curvas de polarización potenciodinámicas permitieron observar el proceso de corrosión en zonas anódicas más amplias con lo cual se identificaron fenómenos de pasivación y de rompimiento de las capas pasivas.

La técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica, permitió determinar que prevalece la transferencia de carga en la interfase aluminio/ electrolito, además de que también se logró determinar la velocidad de corrosión con valores muy similares a los obtenidos por curvas de polarización.

De los aluminios estudiados en medio salino, se podría recomendar emplear Al 2024-T3 con cladding, debido a que el valor de velocidad de corrosión promedio fue de  $5 \times 10^{-4}$  mm por año, sin embargo también el aluminio Al 7075-T6 mostró valores bajos de velocidad de corrosión sin importar la aplicación o no del cladding con valor promedio de  $4.9 \times 10^{-3}$  mm por año. Debido a los resultados previamente mostrados se concluye que el Al 2024-T3 presenta una mayor resistencia a la corrosión.

## 7. REFERENCIAS.

**Arai T**, Baker G, Bates C, Becherer B, Bell T, Bird E. et al. ASM handbook, volume 4, Heat Treating 10a ed. Ohio: ASM international, **2005**; Vol. 4: 22-26.

**Ávila M.**, Genescá J. Más allá de la herrumbre. México: Editorial Fondo de Cultura Económica, **1986**; 73-75.

**Aydi L**, Khlif M, Bradai C, Spigarelli S, Cabibbo M, Mehtedi M. Mechanical Properties and Microstructure of Primary and Secondary AA6063 Aluminum Alloy after Extrusion and T5 Heat Treatment. Materials Today: Proceedings. **2015**; 2: 4890-4897.

**Baboian R.**, Dean S. Pruebas de Corrosión y Evaluación. Philadelphia: ASTM International, **1990**; 366-369.

**Badía J.**, Transformaciones estructurales de las aleaciones de aluminio de alta resistencia. Madrid:**1981**; 7-10

**DeRose J**, Suter T, Hack T, Adey R. Aluminium alloy corrosion of aircraft structures. Boston: Editorial Wit press, **2013**: 134-136.

**Enos D**, Scribner L. The Potentiodynamic Polarization. Reino Unido: Editorial Solartron analytical, **1990**; 3-6.

**Feliu S**, Andrade M. Corrosión y Protección metálica. Madrid: Editorial CSIC, **1991**; 8-10.

**Fontana M.** Corrosion Engineering. United States of America: Editorial McGraw-Hill, **1986**; 62-66.

**González J**, Albéniz J, Feliu S. Valores de la Constante B del método de resistencia a la polarización para veinte sistemas metal-medio diferentes. España: Rev. Metal, **1996**; 32: 10-17.

**Gómez F**, Alcaraz D. Manual básico de corrosión para ingenieros. España: Editorial Universidad de Murcia, **2004**; 25-30.

**Hengquan L**, Leng Y, Guojiang W, Huang N. Corrosion susceptibility investigation of Ti–O film modified cobalt-chromium alloy (L-605) vascular stents by cyclic potentiodynamic polarization measurement. Surface and Coatings Technology. **2011**; 206: 893-896.

**Hughesa A**, Mustera T, Boagb A, Glennc A, Luod C, Zhoud X, Thompsond G, McCullochb D. Co-operative corrosion phenomena: Corrosion Science. **2010**: 52: 665–668

**Khatak H**, Raj B. Corrosion of Austenitic Stainless Steels. Englad: Editorial Woodhead publishing limited, **2002**; 40-41.

**Mendoza J**, Dúran R, Genesca J. Espectroscopía de impedancia electroquímica en corrosión, **2002**; 2-4.

**Molera P**. Tratamientos térmicos de los metales. España: Editorial Marcombo, **1996**; 105-110.

**Morrall F**, Jimeno E, Molera P. Metalurgia general. Barcelona: Editorial Reverté, **2004**; 1357-1361.

**Nunes R**, Adams J, Avery H, Barnhurst R, Ammons M, Bean J, *et al.* ASM handbook, volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special !0a ed. Ohio: Editorial ASM international, **2005**; Vol. 2: 22-26.

**Pérez T.** Aplicación de la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica en el estudio de la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto, **2019**; 2-3.

**Ramesh S.** Applied Welding Engineering Processes, Codes, and Standards. Amsterdam: Editorial Elsevier, **2012**; 76-79.

**Singh R.** Corrosion Control for Offshore Structures. United Kingdom: Editorial Elsevier Inc., **2014**; 16-20.

**Wenyu M, Baoyu W, Lei Y, Xuefeng T, Wenchao X, Jing Z.** Influence of solution heat treatment on mechanical response and fracture behaviour of aluminium alloy sheets: An experimental study. Materials & Design. **2015**; 88: 1119-1126.

**Xu D, Birbilis N, Lashansky D, Rometsch P, Muddle B.** Effect of solution treatment on the corrosion behaviour of aluminium alloy AA7150: Optimisation for corrosion resistance. Corrosion Science. **2011**; 53: 217–225.

**Yang L.** Techniques for corrosion monitoring. Boca Raton: CRC Press LLC, **2008**:179-182.