



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**TESIS**

**TRATAMIENTOS DE CONVERSIÓN QUÍMICA EN  
ALUMINIO CON AGUA OXIGENADA**

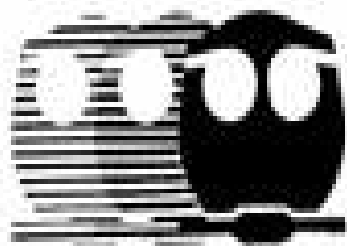
**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA METALÚRGICA**

**PRESENTA**

**PAOLA RONCAGLIOLO BARRERA**

**MÉXICO, D.F.**

**2009**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**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: Carlos Rodríguez Rivera

**VOCAL:** Profesor: Carlos Rosendo Arganis Juárez

**SECRETARIO:** Profesor: Francisco Javier Rodríguez Gómez

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Edgar Onofre Bustamante

**2° SUPLENTE:** Profesor: José Hernández Espinosa

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:** LAB. DE CORROSIÓN 211

FACULTAD DE QUÍMICA. CONJUNTO D, U.N.A.M

**ASESOR DEL TEMA:** **DR. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ**

(nombre y firma)

**SUPERVISOR TÉCNICO:** **EDGAR ONOFRE BUSTAMANTE**

(nombre y firma)

**SUSTENTANTE (S):** **PAOLA RONCAGLIOLO BARRERA**

(nombre y firma)

## **AGRADECIMIENTOS:**

**A** mis padres por todo el amor, el apoyo incondicional, paciencia y todas esas cosas que solo los padres pueden hacer por una hija como yo, que yo creo que fue demasiado. Los adoro. A mi hermana por ser mi ejemplo más cercano a lo que se espera llegar a ser de grande, el amor y todos sus buenos consejos en los momentos críticos de mi vida, también sabes que te amo.

A mis profesores de la carrera de no ser por ellos esto nunca hubiera sido posible, ya que ellos hicieron que me encantara mi carrera, en especial al profesor Francisco Javier Rodríguez Gómez el asesor de esta tesis que me apoyó y me tuvo mucha paciencia.

Al programa de becas PAPIIT IN106607 por apoyarme en el desarrollo de esta tesis.

A mis amigos de la carrera, en especial a Benjamin que de no ser por que siempre estuve de sanguijuela me hubiera costado el doble de trabajo. Te quiero hermanito.

A mis amigas del tocho Julia, Paola, Cris, Yunuen, Claudia, a todas por todas las veces que me sonsacaron haciendo que la carrera fuera más ligera y divertida, por llevarme por chelas después del gimnasio jaja. A mi amigo de siempre Turus por estar conmigo.

A Aldo por hacerme muy feliz, apoyarme y motivarme a tener proyectos y sueños más grandes. Bongoro quiña quiña te amo.

Y a todas las personas que pasaron por mi vida que no están conmigo, pero que fueron importantes y me ayudaron en mi crecimiento emocional.

A la U.N.A.M. por ser la mejor institución de desarrollo intelectual, cultural y deportivo, por hacer de mí la persona de excelencia que soy ahora.

<b>ÍNDICE</b>	<b>PÁGINA</b>
• Agradecimientos	5
• Resumen	6
• Objetivos	8
• Introducción	9
<b>CAPÍTULO 1</b>	
<u>Antecedentes teóricos.</u>	
1.1 Definición de corrosión	
11	
1.2 Corrosión y sus efectos dañinos	12
1.2.1 Problemática de la corrosión	13
1.3 Tipos de corrosión	13
1.3.1 Corrosión uniforme	13
1.3.2 Corrosión galvánica o bimetalica	14
1.3.3 Corrosión localizada en hendiduras (crevice corrosion)	
14	
1.3.4 Corrosión por picaduras (pitting)	15
1.3.5 Corrosión intergranular.	15
1.3.6 Corrosión por erosión	15
1.3.7 Corrosión bajo tensión	16
1.3.8 Corrosión con fatiga	17
1.4 Protección y recubrimientos	18
1.4.1 Control de la corrosión	18
1.4.2 Protección contra la corrosión	18
1.4.3 Tipos de protección anódica	19
1.4.5 Protección y recubrimientos	21
1.4.6 Tipos de recubrimientos	22
1.4.7 Anodizado	23
1.4.8 Electrodepósitos metálicos	23
1.4.9 Otros recubrimientos	23
1.4.10 Tratamientos de conversión química	24

1.5 Peróxido de hidrógeno y sus propiedades	24
1.6 Técnicas para la evaluación de la corrosión	
25	
1.6.1 Resistencia a la polarización (Rp)	26
1.6.2 Curvas de polarización	27
1.6.3 Polarización cíclica	30
1.6.4 Impedancia electroquímica (IE)	30

## **CAPÍTULO 2**

### Desarrollo Experimental.

2.1 Corte y preparación de cupones	33
2.2 Preparación de superficie y soluciones	34
2.3 Tratamiento químico con agua oxigenada	34
2.4 Anodizado	34
2.5 Determinación permanganométrica de peróxido de hidrógeno	35
2.6 Pruebas electroquímicas	36
2.6.1 Potencial contra tiempo	38
2.6.2 Resistencia a la polarización (Rp)	38
2.6.3 Curvas cíclicas	39
2.6.4 Impedancia electroquímica	39
2.6.5 Inspección visual y análisis químico	39
2.6.6 Preparación de sustancias	40

## **CAPÍTULO 3**

<u>Resultados y Análisis de resultados</u>	42
--	----

## **CAPÍTULO 4**

<u>Conclusiones</u>	65
• <b>Bibliografía</b>	67
• <b>Apéndice</b>	70

## RESUMEN:

Los tratamientos de conversión química son una técnica muy utilizada para poder pasivar tanto aluminios como aceros inoxidable y aceros galvanizados debido a que es una técnica mucho más económica y ecológica en comparación con el cromatado que se realiza con cromo hexavalente.

Existen tratamientos alternativos como el pavonado, el anodizado, el fosfatado y en estudios recientes se ha descubierto que las tierras raras como el  $CeCl_3$  junto con el agua oxigenada producen una buena protección anticorrosiva en ambientes agresivos.

En general, los tratamientos de conversión química tienen como finalidad modificar las propiedades de la superficie a recubrir. Éstos pueden estar asociados a motivos decorativos o funcionales, por ejemplo:

- Aumento de resistencia a la corrosión
- Aumento de resistencia al ataque de sustancias químicas
- Incremento de la resistencia a la fricción y al rayado
- Mejoramiento de propiedades eléctricas
- Mejoramiento de propiedades ópticas
- Ofrecer sustrato de anclaje para pinturas

En este trabajo se buscó realizar el tratamiento de conversión, solo con el uso de agua oxigenada (peróxido de hidrógeno) como agente pasivante y no con la combinación de ésta con  $CeCl_3$  y comprobar si realmente se da la protección contra la corrosión, a través de la aplicación de técnicas electroquímicas como Resistencia a la polarización e Impedancia electroquímica. También se busca comparar el aluminio anodizado con el aluminio tratado, para proponer un método alternativo al comercial, buscando que sea amigable con el ambiente y redituable económicamente.

Se manejaron dos concentraciones de agua oxigenada, una de 11 mL/ L

(comercial) y de 30 mL /L (analítica), para obtener una concentración óptima y así compararla con el aluminio desnudo y el aluminio anodizado. En este trabajo se realizaron pruebas electroquímicas en una solución de 3% en cloruros a partir de cloruro de sodio (NaCl), análisis a través de microscopía electrónica de barrido de la superficie y análisis químico por Rx.

Una vez realizadas estas pruebas se concluye que la concentración óptima para el tratamiento es de 30 mL/L y que se modifica la morfología de la superficie, provocando que la resistencia a la corrosión en comparación con el metal desnudo se mejorara.

Con respecto a la comparación con el aluminio anodizado y el tratamiento químico, los comportamientos en el electrolito son muy diferentes, por lo que la resistencia no presenta valores similares y los mecanismos de corrosión son diferentes. Por lo que el método de conversión química propuesto no puede sustituir eficientemente al anodizado presentado en este trabajo.



## **OBJETIVOS:**

- Determinar la concentración óptima para el tratamiento de conversión química con peróxido de hidrógeno.
- Determinar el tiempo al cual el metal tratado se estabiliza en el medio, a través del seguimiento de Potencial de corrosión ( $E_{\text{reposo}}$ ) contra el tiempo.
- Evaluar el grado de agresividad del tratamiento de conversión sobre el sustrato por medio de la Resistencia a la polarización.
- Evaluar electroquímicamente la pasivación en sustratos de aluminio, con la inmersión completa en agua oxigenada como agente pasivante y promotora de tratamientos de conversión.
- Caracterizar y analizar el efecto del agua oxigenada sobre el aluminio.
- Comparar las propiedades anticorrosivas de un aluminio anodizado y el aluminio tratado químicamente
- Analizar la superficie y la composición de la película pasivante a través de Microscopía Electrónica de Barrido(MEB)

## INTRODUCCIÓN:

**E**l objetivo del tratamiento de conversión química es modificar la superficie del material por un ataque químico, esto permite que los recubrimientos tengan una mayor adherencia y proveen al material de una protección anticorrosiva extra que proporciona al metal una duración mayor que si se contara con el metal desnudo.

El estudio de este tratamiento químico se da por la búsqueda de nuevas alternativas más ecológicas que el cromatado o el anodizado que son los más comercialmente usados por la industria, ya que los residuos de estos dos tratamientos son altamente tóxicos y dañinos para el medio ambiente.

Se realizó, como prueba alternativa al anodizado, un tratamiento de conversión química con agua oxigenada sin tierras raras ( $\text{CeCl}_3$ ) lo que daría agua como producto o residuo del tratamiento, ecológicamente muy recomendable, esto involucró la completa inmersión del metal en agua oxigenada a diferentes concentraciones manteniendo un tiempo constante de inmersión. Primero había que observar si el material se trataba superficialmente y cuál de las concentraciones era la óptima para formar una capa más resistente o que realmente se presentara una conversión química de la superficie. Una vez comprobado que el material sí presenta un cambio en la superficie, y no nada más una capa adherida levemente por la acción de la pérdida de oxígeno del agua oxigenada, se pasó a la caracterización de la resistencia de esta capa.

Todo esto es posible comprobarlo con pruebas electroquímicas, que a través de la interpretación de los datos pueden revelar la resistencia de la película, y qué fenómenos se están presentando en la superficie del material.

Después de caracterizar el comportamiento del material tratado químicamente se buscó darle una comparación de uso con un aluminio anodizado, que como ya se dijo anteriormente es el proceso más comercial.

Lo importante de este estudio es poder decir si este tratamiento realmente es una alternativa viable no solo ecológicamente, si no que presente características de resistencia similares para poder sustituir un proceso con el otro.

# **CAPÍTULO 1**

## **ANTECEDENTES TEÓRICOS**

### **1.1 Definición de Corrosión**

Existen muchas definiciones para corrosión. La más comúnmente aceptada es la siguiente:

*“Corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente”<sup>(1)</sup>*

Nótese que hay otras clases de daños como los causados por medios físicos. Ellos no son considerados plenamente corrosión, sino *erosión* o *desgaste*. Existen, además, algunos casos en los que el ataque químico va acompañado de daños físicos y entonces se presenta una *corrosión-erosiva*, *desgaste corrosivo* o *corrosión por fricción*.

Aún así, la corrosión es un proceso natural, en el cual se produce una transformación del elemento metálico a un compuesto más estable, que es un óxido.

Se puede observar que la definición que se ha indicado no incluye a los materiales no-metálicos. Otros materiales, como el plástico o la madera, no sufren corrosión; pueden agrietarse, degradarse, romperse, pero no corroerse.

Generalmente se usa el término “oxidación” para indicar la corrosión de metales y de sus aleaciones.

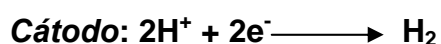
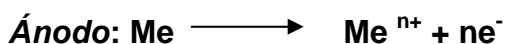
Es importante distinguir dos clases de corrosión: Corrosión Seca y Corrosión Húmeda. La corrosión se llama seca cuando el ataque se produce por reacción química, sin intervención de corriente eléctrica. Se llama húmeda cuando es de naturaleza electroquímica, es decir que se caracteriza por la aparición de una corriente eléctrica dentro del medio corrosivo. A grandes rasgos la corrosión química se produce cuando un material se disuelve en un medio líquido corrosivo hasta que dicho material se consume, o se satura el líquido. La corrosión electroquímica se produce cuando al poner ciertos metales con alto número de electrones de valencia, con otros metales, estos tienden a captar dichos electrones libres produciendo corrosión.

## 1.2 Corrosión y sus efectos dañinos.

La corrosión electroquímica es un proceso espontáneo que denota siempre la existencia de una zona anódica (la que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, y es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodos y cátodos, para que este tipo de corrosión pueda tener lugar. La corrosión más frecuente siempre es de naturaleza electroquímica y resulta de la formación sobre la superficie metálica de multitud de zonas anódicas y catódicas.

El proceso de disolución de un metal en un ácido es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica revela la existencia de infinitos cátodos, mientras que en los ánodos se va disolviendo el metal. A simple vista es imposible distinguir entre una zona anódica y una catódica dada la naturaleza microscópica de las mismas (micropilas galvánicas). Al cambiar continuamente de posición las zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve totalmente.

Las reacciones que tienen lugar en las zonas anódicas y catódicas son las siguientes:



Ya que la corrosión de los metales en ambientes húmedos es de naturaleza electroquímica, una aproximación lógica para intentar frenar la corrosión sería mediante métodos electroquímicos. Los métodos electroquímicos para la protección contra la corrosión requieren de un cambio en el potencial del metal para prevenir o al menos disminuir su disolución.

La protección catódica, en este sentido, es un tipo de protección (electroquímico) contra la corrosión, en el cual el potencial del electrodo del metal en cuestión se desplaza en la dirección negativa.

### **1.2.1 Problemática de la Corrosión**

La corrosión afecta principalmente a los metales y ello implica muchos tipos de problemas, de los cuales la mayoría son bastante serios, a los que nos referiremos más adelante, ya que primero conviene conocer las diversas clases de corrosión existentes y cómo es posible tratar de detenerla.

Aún así, mencionemos que este proceso en sus variadas formas (dentro de las cuales se puede presentar) va produciendo un deterioro considerable en las clases de metales que afecta, los cuales con el tiempo, si no son tratados, inducen a su completa destrucción, lo cual implica también enormes pérdidas económicas y de producción.

### **1.3 Tipos de corrosión**

Se considera la apariencia del metal con corrosión.

En general basta la inspección visual para distinguir entre las formas de corrosión siguientes:

#### **1.3.1 Corrosión uniforme:**

La reacción actúa sobre toda la superficie expuesta (o sobre un área grande). El espesor del metal se reduce y eventualmente falla. Representa la mayor destrucción de metal. La vida de un equipo o estructura puede estimarse mediante ensayos. Se previene con protección catódica.

Las otras formas de corrosión son localizadas, y la zona afectada se reduce a partes de la estructura. Tienden a causar fallas prematuras o inesperadas. Son más difíciles de calcular.

### 1.3.2 Corrosión galvánica o bimetálica:

Dos metales diferentes generalmente tienen diferencias de potencial cuando se les coloca en una solución conductiva. Si se ponen en contacto los metales, entonces hay flujo de electrones entre ellos.

El metal menos resistente a corrosión pasa a ser ánodo, la más resistente pasa a ser cátodo. El cátodo se corroe muy poco en este caso, pero el ánodo aumenta su corrosión, comparado con los metales aislados entre sí.

Este principio puede usarse como forma de protección de una estructura. La estructura se usa como cátodo. Como ánodo se usa zinc (Zn) o magnesio (Mg), que no son resistentes a corrosión. El ánodo se sacrifica.

### 1.3.3 Corrosión localizada en aberturas (crevice corrosion)

Este tipo de corrosión se da en aberturas pequeñas (pueden ser hendiduras, grietas) se acumulan pequeñas cantidades de solución estancada. Se deposita una sustancia (arena, polvo) que actúa como escudo y crea las condiciones de ambiente estancado por debajo de él. Se puede cortar el acero inoxidable colocándole una banda de goma alrededor y sumergiéndolo en agua de mar. El efecto es formar una celda donde se concentra la corrosión.

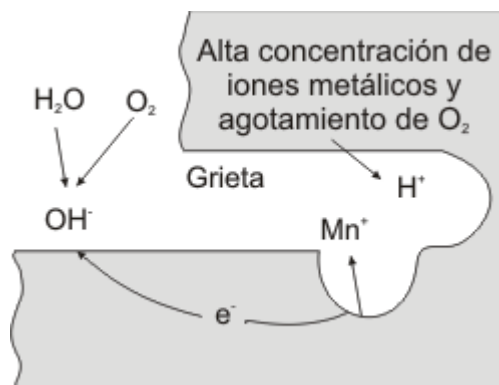


Fig. 1.1 Representación gráfica del mecanismo de formación de picaduras <sup>19</sup>

Algunas formas de prevenir esta clase de corrosión son las siguientes:

- Rediseño del equipo o pieza afectada para eliminar fisuras.
- Cerrar las fisuras con materiales no absorbentes o incorporar una barrera para prevenir la humedad.
- Prevenir o remover la formación de sólidos en la superficie del metal.

#### **1.3.4 Corrosión por picaduras (pitting)**

Es una forma de corrosión localizada en grado extremo, que produce un agujero en el metal. Pueden hacer agujeros aislados o tan cercanos que dan la impresión visual de una superficie rugosa.

Es una de las formas más destructivas, pero la pérdida de material es muy poca. Es difícil medirlo porque la perforación queda cubierta con el óxido. A veces requieren tiempos largos para actuar (meses o años). Generalmente crece en la dirección de la gravedad.

#### **1.3.5 Corrosión intergranular.**

En la mayoría de los casos, los bordes entre granos no cumplen ningún rol especial, pero bajo ciertas condiciones, las interfases de granos son muy reactivas y se produce corrosión localizada, sin que aparezca corrosión en los granos. Los granos se reparan, la aleación se desintegra o pierde rigidez. Puede ser causada por impureza en los contornos de los granos. Es muy severa en soldaduras de acero inoxidable que ha sido calentado de 500°C hasta 800°C.

#### **1.3.6 Lixiviado selectivo (selective leaching)**

Consiste en extraer el líquido de un material, o la remoción de un elemento de una aleación sólida por un proceso de corrosión. Lo selectivo es que extrae un



componente, como el zinc, aluminio, cobalto, etc. Puede ser uniforme o localizada.

### **1.3.7 Corrosión por erosión**

Ocurre por el movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie de un metal. En general este movimiento es bastante rápido y ocurren desgastes mecánicos o abrasión. El proceso remueve metal de la superficie como iones disueltos o forma productos sólidos de corrosión que son barridos mecánicamente de la superficie metálica. Aparecen ranuras, ondulaciones, agujeros redondeados, pero con un patrón direccional dado por el movimiento del fluido. Las fallas ocurren en tiempos cortos (semanas) y son inesperadas porque los ensayos de laboratorios se hacen en condiciones estáticas que no reflejan las condiciones de erosión del flujo.

### **1.3.8 Corrosión bajo tensión**

Es la fisuración producida por corrosión bajo tensión de tracción. Cuando hay fisuras por corrosión bajo tensión (SCC) el resto de la superficie no aparece afectada y aparecen fisuras finas que van creciendo. Las tensiones necesarias para falla por SCC son del orden de las de diseño. La apariencia de las fisuras es como si fuera fractura frágil, puede ser entre granos o ir por dentro de granos.

Para diferentes tipos de acero el comportamiento es similar: al aumentar  $\sigma$  (esfuerzo) disminuye el tR (Resistencia a la tensión). ¿Hay un  $\sigma_{\min}$  necesario para que exista un tR? Puede ser del orden del 10%  $\sigma_y$  (Módulo de Young).

La fuente de  $\sigma$  puede ser cargas externas, tensiones residuales, térmicas, de soldadura.

Inicialmente la tasa de progreso de una fisura es constante, hasta que la sección transversal se reduce y aumenta  $\sigma$ , hasta que se produce la rotura como un proceso mecánico.

El tiempo es importante en SCC, debido a que la mayor parte del daño mecánico ocurre para tiempos avanzados.

Las deformaciones  $\epsilon$  no aumentan significativamente durante el proceso de fisuración, pero llega un tiempo de exposición al agente corrosivo en el que suben (similar a una fisuración) y se rompe el material.

Esto muestra que los ensayos de SCC deben hacerse hasta la rotura, porque los fenómenos importantes ocurren sólo en las etapas finales.

Los mecanismos de SCC no se conocen muy bien, debido a la complejidad del acoplamiento del metal, la interfase y el ambiente. La información más confiable es la empírica. La corrosión juega un papel muy importante en el inicio de una fisura. Esto produce concentración de  $\sigma$ , que aumenta a medida que el radio del agujero o ranura disminuye. Puede producirse deformación plástica en el extremo de fisuras.

### **1.3.9 Corrosión con fatiga**

Es otro caso de corrosión bajo  $\sigma$ , aunque ocurre cuando hay ciclos de  $\sigma$  en el tiempo.

Se observa en la zona de fatiga la aparición de productos de corrosión, en lugar de ser una zona lisa como en fatiga sola. La fatiga con corrosión es la reducción de la resistencia a la fatiga debido a la presencia de un medio corrosivo. La presencia de óxido en la superficie no garantiza que la falla sea debida a la fatiga con corrosión, puede ser fatiga simple.

El estudio de este tipo de corrosión es importante en industria aeroespacial, nuclear, off shore, submarinos. Incide en la frecuencia de ciclos de  $\sigma$ , siendo más pronunciada cuando las frecuencias son bajas, lo que da más tiempo a que actúe la corrosión, dando mayor tiempo de contacto con el agente corrosivo.

Se cree que la resistencia a la fatiga se reduce por el agente corrosivo porque los pequeños agujeros de corrosión producen concentración de tensiones. La falla se produce a nivel transgranular (por dentro de granos) y no se muestran

las ramificaciones que son características de fisuras que progresan entre bordes de granos del material. Las etapas finales de fatiga con corrosión son iguales a las de fatiga porque ese proceso es mecánico y no incide el agente corrosivo.

En la mecánica de fractura se suele cambiar KIC por otro valor KIC SCC que tome en cuenta que la corrosión reduce la resistencia del material. Por debajo de KIC SCC no ocurre fisuración por corrosión y deja de importar. Este enfoque también se usa en fatiga con corrosión. Funciona bien en aceros con aleaciones bajas y de alta resistencia. Es menos efectivo en aceros inoxidables austeníticos.

## **1.4 Protección y recubrimientos**

### **1.4.1 Control de la corrosión**

Luego de haber analizado la corrosión y sus formas, es momento de ver qué conocimientos se tienen hoy en día para prevenirla.

### **1.4.2 Protección contra la corrosión**

Existen dos mecanismos: protección catódica o anódica.

Catódica: se hace suministrándole electrones a la estructura que se protege. Esto evita que se disuelva el metal. Hay dos maneras de hacerlo: (a) Por una fuente eléctrica externa, y (b) por el acoplamiento galvánico. En el acoplamiento galvánico, la corrosión ataca al magnesio, que cede electrones. El magnesio actúa como ánodo que se sacrifica para salvar el acero (cátodo). Se usa en tuberías enterradas, con ánodos espaciados a lo largo de la tubería para proveer corriente uniforme. Hay que calcular el potencial electroquímico de la estructura en el medio. Las condiciones de borde son difíciles de determinar, porque el medio electrolítico es infinito (mar o suelos). El problema es optimizar la corriente y la ubicación de las placas de magnesio (Mg).

Anódica: se basa en formar una película protectora sobre metales por medio de corrientes anódicas aplicadas externamente. Usa corrientes pequeñas, pero

para instalarla hace falta una instrumentación compleja. Es más nueva que la protección catódica.

### **1.4.3 Tipos de protección anódica**

Pasividad: Se conoce como pasividad a la propiedad que presentan algunos metales de permanecer inertes en condiciones ambientales en las que, guiados por la termodinámica, se esperarían reacciones violentas. Es una propiedad de inmenso valor práctico, ya que permite que metales muy activos y relativamente económicos, tales como el aluminio, cromo, titanio, circonio y otros, puedan ser utilizados en medios altamente corrosivos y se comporten como si fueran metales nobles.

No todos los materiales metálicos y sus aleaciones se pueden considerar siempre susceptibles de corrosión, ya que existen algunos que, aun siendo activos bajo ciertas condiciones ambientales, pierden su reactividad química y en consecuencia se convierten en inertes. A este fenómeno se le denomina pasividad y se da en metales tales como el Cr, Fe, Ni, Ti y en buena parte de sus aleaciones, debiéndose a la formación de una delgada película de óxido que se encuentra perfectamente adherida a la superficie del metal y que actúa como elemento protector de la corrosión.

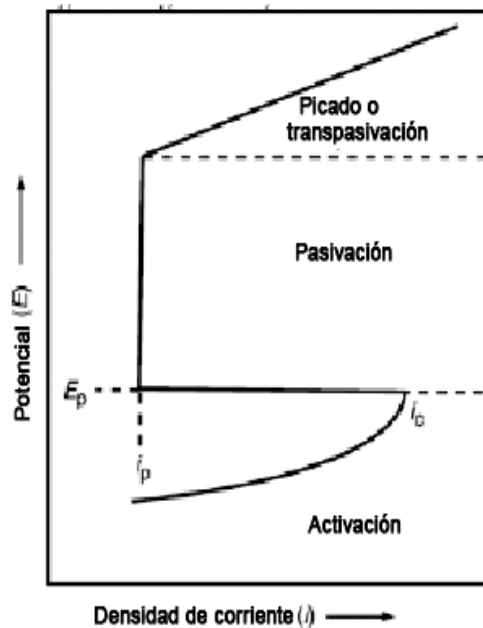


Fig. 1.2. Gráfica de densidad de corriente contra potencial mostrando las zonas activas, pasivas y de picadura y transpasivación <sup>(1)</sup>

### Formación y naturaleza de las películas pasivantes.

Según Sato<sup>(2)</sup>, las películas pasivantes se pueden formar de tres modos diferentes:

- a) Por reacción directa del metal con el medio. Se forma así una monocapa adsorbida de oxígeno, una capa compacta de óxido, o una película salina sobre el metal.
- b) Por disolución y precipitación. Se producen iones metálicos por disolución anódica. Estos iones, al entrar en contacto con el medio, reaccionan, dando un compuesto insoluble, óxido o sal, que precipita sobre la superficie metálica, pasivándola.
- c) Por deposición anódica. En este caso los iones metálicos producidos por disolución anódica sufren una nueva oxidación dando un óxido, o una sal insoluble.

En cuanto a la naturaleza de las películas pasivantes, el mismo autor distingue cinco tipos diferentes (Figura 1.3):

Tipo 1: Película adsorbida, consistente en una capa monoatómica o

polimolecular de oxígeno u otras especies.

Tipo 2: Película barrera, consistente en una capa tridimensional de óxido capaz de resistir un campo eléctrico de  $10^6$  a  $10^7$  V/cm. Usualmente las películas Tipo 1 evolucionan a películas Tipo 2, por lo que es difícil establecer un límite nítido entre los dos tipos.

Tipo 3: Película barrera formada sobre una película menos protectora. Se la encuentra en la capa pasiva del cobalto en soluciones neutras. En este caso se observa una primera etapa de pasivación, debida a una capa de  $\text{CoO}$ , siguiendo luego, a mayores potenciales, una segunda etapa de pasivación, donde la película anterior es cubierta por una capa más protectora de  $\text{Co}_3\text{O}_4$ . También se encuentran este tipo de películas sobre el cobre pasivado en soluciones neutras. En este caso las películas son  $\text{Cu}_2\text{O}$   $\text{CuO}$ , respectivamente.

Tipo 4: Película barrera, cubierta por una capa externa poco protectora. Se encuentra en la película pasiva del hierro en soluciones neutras, del cobalto en soluciones alcalinas, o del titanio en soluciones ácidas. El espesor de la capa barrera es función del potencial, en tanto que el espesor de la película depositada es independiente del potencial.

Tipo 5: Película capa barrera cubierta por una película porosa, ambas de la misma composición. El ejemplo más característico de este tipo de película es el que se forma sobre el aluminio anodizado en soluciones ácidas, tales como ácido sulfúrico, ácido fosfórico, etc. Sobre una capa barrera, de espesor constante, crece una capa porosa, cuyo espesor es función del tiempo de anodizado. En el caso del aluminio, estos poros pueden ser sellados por tratamientos adecuados, resultando así una película que protege mecánicamente al metal. Si antes del sellado, se llenan los poros con pigmentos adecuados, se obtienen las piezas de aluminio coloreado que vemos corrientemente en numerosas aplicaciones decorativas.

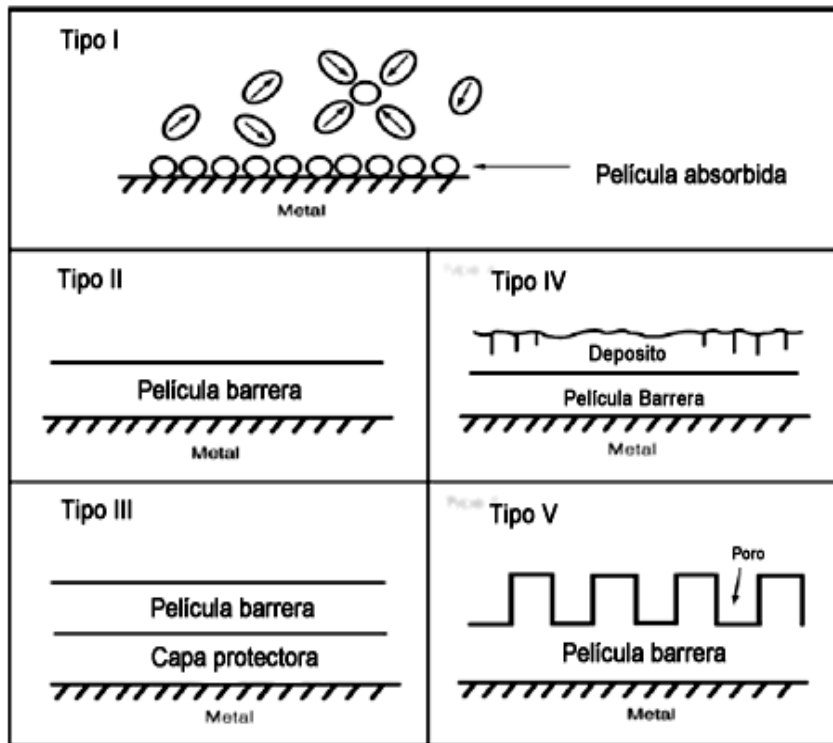


Fig. 1.3. Se muestran los tipos de películas que se pueden formar en la superficie de un metal. <sup>(1)</sup>

#### 1.4.5 Protección y recubrimientos

Cuando un metal está expuesto a la intemperie y a ciertos cambios de temperatura, e incluso en un ambiente agresivo en su contra, se puede decir que es un metal propenso a la corrosión, y por tales situaciones, para facilitar y prolongar la vida de su funcionamiento, se le debe aplicar un recubrimiento. En muchos de estos casos es utilizado un recubrimiento orgánico, sin embargo, estos no son tan efectivos como los recubrimientos metálicos o de conversión.

A pesar de que el aluminio puede ser utilizado en diferentes aplicaciones sin la necesidad de emplear tratamientos superficiales, resulta adecuado aplicar acabados para reducir o eliminar problemas de corrosión, proporcionar color u otros acabados decorativos a la superficie o mejorar las propiedades intrínsecas del material base. La elección del tratamiento superficial viene determinada por las características de la aleación, aspecto deseado,

condiciones de servicio, costo del proceso y requerimientos exigidos.

Un recubrimiento puede llegar a tener diferentes usos, en cualquier caso, por lo general son utilizados para evitar la corrosión de los metales, sin embargo existen otros usos como el endurecimiento de superficies, la rectificación o recubrimiento de dimensión de alguna pieza metal mecánica, para ayudar a la lubricación y para resistir la abrasión.

Cuando una pieza mecánica está sometida a un esfuerzo durante mucho tiempo, tiende a desgastarse, lo que propicia su mal funcionamiento hasta su falla y puede llegar a generar un accidente. Por tal motivo, se dedica el estudio de la dureza de los materiales, que en la mayoría de los casos, deben ser recubiertos o revestidos por inmersión o metálicamente, para que puedan alcanzar su dureza y de esta manera un óptimo funcionamiento.

#### **1.4.6 Tipos de recubrimientos**

Los recubrimientos o revestimientos se clasifican por lo general en dos clases: Recubrimientos orgánicos, que son recubrimientos de diferente naturaleza que suelen ser aplicados para mejorar la resistencia frente a la corrosión, las propiedades funcionales del sustrato o, sencillamente, con fines decorativos; y los recubrimientos inorgánicos entre los cuales se encuentra el recubrimiento de conversión, a los cuales nos vamos a referir en la presente investigación, que son básicamente películas inorgánicas formadas por acciones químicas con las superficies de un metal, pero con frecuencia se impregnan con sustancias orgánicas.

Por lo general son mucho menores de 0.001 pulgadas de espesor, pero normalmente se forman desde la superficie original y están estrechamente ligadas y no causan cambio dimensional apreciable.

Las formas más comunes de recubrimientos o revestimientos son de fosfato,



cromato, óxido y revestimientos anódicos, en las cuales se aplican aleaciones de aluminio, zinc, titanio y magnesio, por medios electroquímicos.

#### **1.4.7 Anodizado**

Capas de óxido, obtenidas electroquímicamente, con un amplio rango de espesores, colores, grados de dureza, resistencia a la corrosión, propiedades ópticas y eléctricas. Estas capas suelen ser utilizadas en aplicaciones donde se requiere máxima protección frente a la corrosión.

#### **1.4. 8 Electrodepósitos metálicos**

Recubrimientos metálicos obtenidos mediante procesos químicos o electroquímicos que le confieren al sustrato diferentes acabados y propiedades funcionales.

#### **1.4.9 Otros recubrimientos**

La rectificación o el recubrimiento de las dimensiones de piezas metal mecánicas, son muy comunes en la industria, y en ésta también se aplica el recubrimiento, para hacer dimensión o cuerpo de las piezas a tratarse. Esta se explica fácilmente en la rectificación de ejes de motores ó en las camisas de motores de combustión interna (de los automóviles), en las cuales se aplican un recubrimiento como el metalizado, y luego se rectifica para dar la dimensión correcta del mecanismo.

#### **1.4.10 Tratamientos de conversión química**

Los recubrimientos de conversión son aquellos que se producen por efecto de una conversión química de la superficie de un sustrato metálico, y cuya finalidad es proteger al sustrato de la corrosión o modificar sus propiedades tribológicas o de adherencia.

Otros recubrimientos, como los de óxido, sirven como base para pintura y como acabados finales, son relativamente baratos y cuando se impregnan con aceite y sosa, proporcionan buena resistencia a la corrosión.

### **1.5 Peróxido de hidrógeno**

*Propiedades químicas.* El peróxido de hidrógeno se usa principalmente como un agente oxidante para muchos compuestos orgánicos e inorgánicos. Sin embargo, cuando el peróxido de hidrógeno se usa con oxidantes más fuertes, puede actuar como un agente reductor. El subproducto principal de peróxido de hidrógeno es el agua. Ya que el peróxido de hidrógeno no genera residuos peligrosos, se prefiere como oxidante en muchas industrias. Es importante que las mezclas de sustancias orgánicas de peróxido de hidrógeno se traten con precaución extrema. La química compleja de tales reacciones requiere un estudio exhaustivo de los peligros potenciales de seguridad. El peróxido de hidrógeno y muchos materiales orgánicos pueden formar mezclas explosivas si no se siguen las precauciones de seguridad adecuadas.

*Propiedades físicas.* El peróxido de hidrógeno es más denso que el agua pero es miscible en el agua en todas las proporciones. Las soluciones acuosas del peróxido de hidrógeno se parecen al agua pero tienen un olor picante, débil. Es un líquido no combustible, pero el calor y el oxígeno liberados durante la descomposición pueden inflamar los materiales combustibles.

### **1.6 Técnicas para la evaluación de la corrosión**

Objetivos de las pruebas para evaluar la corrosión

La primera y más importante parte de las pruebas electroquímicas para poder controlar la corrosión consiste en definir objetivos claros e importantes criterios para la interpretación de los resultados de las pruebas. La definición de objetivos es importante porque determina el tipo de información que resultará más pertinente a los objetivos de la prueba.

Para poder realizar las pruebas se necesita tener en cuenta los siguientes puntos:

- Determinar el mejor material para cubrir una necesidad (selección de materiales).
- Predicción de la probable vida útil de un producto o de una estructura.
- Evaluar las nuevas aleaciones comerciales y los procesos.
- Proponer el desarrollo de materiales con una mejor resistencia a la corrosión.
- Evaluar las variaciones del medio ambiente y los controles (inhibidores).
- Determinar el medio más económico para reducir la corrosión.
- Estudiar los mecanismos de corrosión.

En el ámbito de la investigación de aleaciones o el desarrollo de optimización de procesos, el investigador tiene por objeto mejorar para el mañana el material de hoy.

### 1.6.1 Resistencia a la polarización ( $R_p$ ).

Stern y Geary simplificaron la ecuación que describe la transferencia de carga controlada por la cinética de reacción la cual se muestra a continuación

$$i_{\text{corr}} = \left( \frac{\Delta i_{\text{app}}}{2.3 \Delta E} \right) \left( \frac{\beta_a \beta_c}{(\beta_a + \beta_c)} \right)$$

Ordenando

$$i_{\text{corr}} = \left( \frac{1}{2.3 R_p} \right) \left( \frac{\beta_a \beta_c}{(\beta_a + \beta_c)} \right)$$

Donde  $R_p$  es la resistencia a la polarización ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ), asignado por  $\partial E / \partial i$  en

$t = \infty$  y  $\Delta E$  tiende a 0.

$\Delta i_{app}$  es a menudo aproximadamente lineal con el potencial dentro de  $\pm 5$  a 10 mV de  $E_{corr}$  como muestra el acero inoxidable AISI 430 en  $H_2SO_4$  (Fig. 1.4). La pendiente de esta curva se determina por  $\Delta E / \Delta i$ , en las inmediaciones del  $E_{corr}$ .

La resistencia de polarización es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión. La superficie del electrodo de trabajo debe ser conocida. El conocimiento de las pendientes catódicas y anódicas,  $\beta_c$  y  $\beta_a$ , permitirá la determinación directa de la velocidad de corrosión.

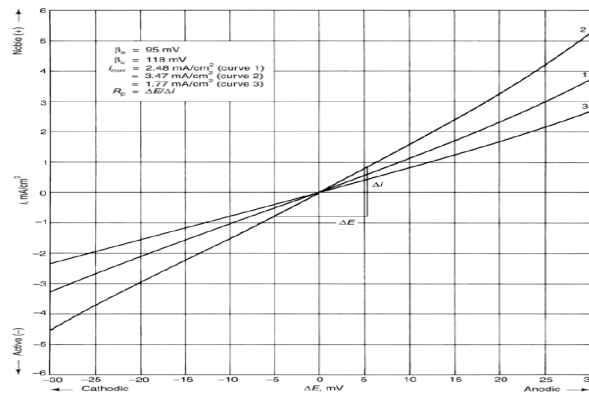


Fig. 1.4. ASTM G59 curvas de polarización para la medida de la resistencia a la polarización basada en los resultados de ocho laboratorios independientes con un acero inoxidable tipo 430 en una solución 1 N  $H_2SO_4$  donde se muestra en la curva 2 y 3 el 95 % de límite de error. (2)

Otra forma de ver la resistencia a la polarización es a través de un circuito eléctrico (Fig.1.5) para simular la corrosión de la interfase del metal y la solución. La suma de las resistencias óhmica de la impedancia resultante más el capacitor, dan como resultado la resistencia a la polarización, ya que, estos son valores conocidos. La relación que se da por la tasa de pérdida de material por la corrosión puede ser un poco alta pero esto puede ser corregido a través del uso de la electroquímica.

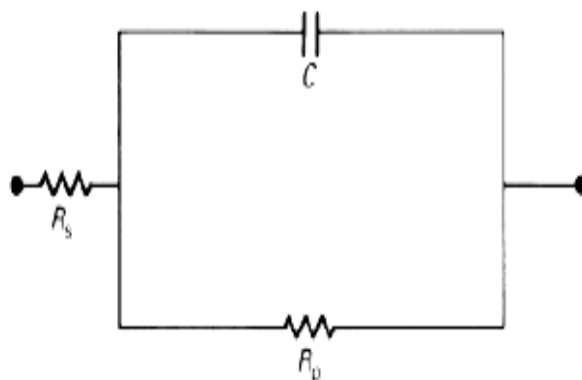


Fig. 1.5. Modelo de un circuito eléctrico que simula de forma simple las resistencias entre el metal, electrolito e interfase.  $R_s$  es la resistencia de la solución,  $R_p$  la resistencia a la polarización,  $C$  es la capacitancia de la doble capa <sup>(1)</sup>

### 1.6.2 Curvas de polarización.

Las curvas de polarización permiten determinar si un metal es susceptible a la corrosión uniforme o al ataque localizado. Si polarizamos un electrodo primero en sentido anódico y luego en sentido catódico podemos obtener pares de valores de corriente y potencial. En el eje X se grafica el valor absoluto de la corriente y en el de las ordenadas el valor del potencial  $E$ , donde obtendremos un diagrama de Evans. Observamos que existe un valor para el cual la corriente anódica es igual que la corriente catódica que se denomina  $i_{corr}$  y que corresponde a un potencial  $E_{corr}$ .  $E_a$  es el potencial del ánodo y  $E_c$  el potencial del cátodo,  $E_a$  y  $E_c$  son los potenciales medidos cuando circula una corriente  $i$ .  $E_a^0$  y  $E_c^0$  son los potenciales estándares de equilibrio de las reacciones anódica y catódica respectivamente.  $E_a^0 - E_{corr}$  es igual al sobrepotencial  $\eta_a$  y  $E_c^0 - E_{corr}$  es igual al sobrepotencial  $\eta_c$ . El sobrepotencial  $\eta$  muestra entonces cuánto se aparta el potencial del ánodo o del cátodo del valor de  $E_{corr}$ . Cuando apartamos el valor del potencial del electrodo del valor de  $E_{corr}$  decimos que estamos polarizando el electrodo, por eso la curva se denomina curva de polarización (anódica o catódica). Obtendremos una curva de polarización anódica cuando

aplicamos un sobrepotencial anódico, y una curva de polarización catódica cuando nos desplazamos en sentido catódico respecto del  $E_{\text{corr}}$ .

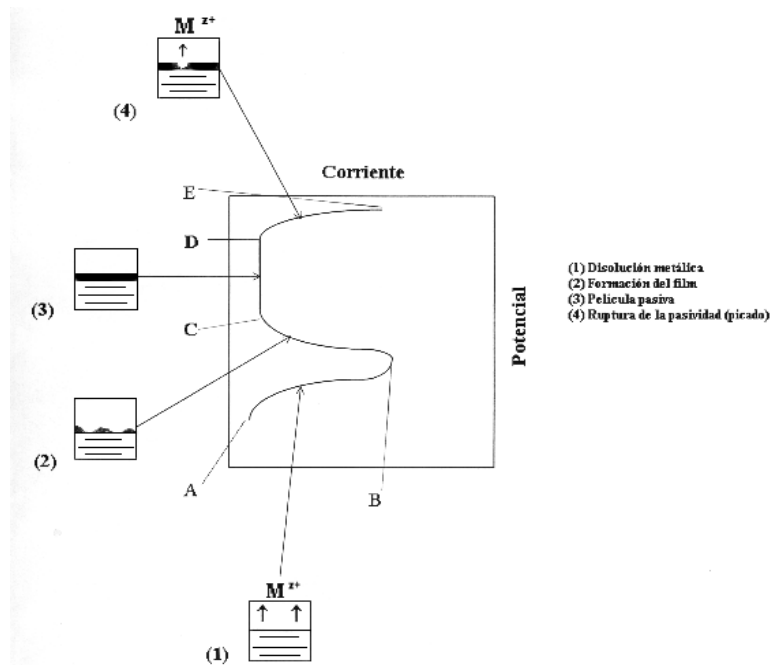


Fig. 1.6 En la figura siguiente se puede observar que la curva de polarización anódica del acero inoxidable consta de varias regiones: a) Una región (AB) donde predomina la disolución del metal en la que la corriente aumenta al aumentar el potencial, b) Una región (BC) en que al comenzar a formarse una película delgada de óxido sobre la superficie la reacción de disolución se va inhibiendo y la corriente descende, c) Una región (CD) en que la corriente se mantiene constante y muy baja al aumentar el potencial (región de pasivación), esta región concluye en el potencial de ruptura de la pasividad, al producirse un incremento brusco de la corriente debido, por ejemplo, a un proceso de picado, d) Una región (DE) que comienza en el potencial de ruptura y donde un pequeño aumento de potencial origina un ascenso muy grande de la corriente.

(20)

En una solución acuosa la superficie alcanzará el valor de un potencial relativamente estable  $E_{\text{corr}}$  que dependerá de la habilidad y la velocidad con que los electrones pueden intercambiarse en las reacciones anódica y catódica.

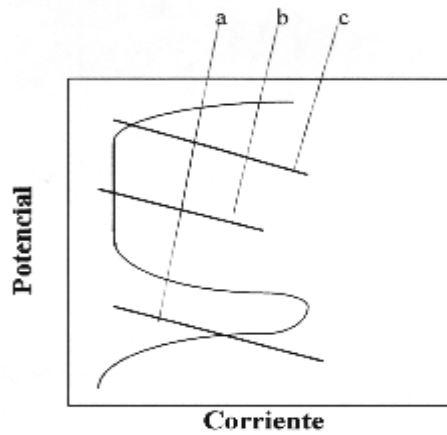


Fig. 1.7 La figura siguiente reproduce el modelo de Genshaw-Brusic-Bockris que describe la formación de la capa pasiva sobre un metal. <sup>(2)</sup>

El análisis de la curva de polarización anódica juntamente con el de la curva de polarización catódica nos permitirá deducir la condición espontánea del sistema, es decir cuando no se aplique polarización sobre el mismo, que corresponde al potencial a circuito abierto  $E_{\text{corr}}$ .

Las líneas a, b y c de la figura 1.7 corresponden a tres casos posibles de intersección de la curva anódica con la catódica. Recordemos que la intersección implica la condición en que la corriente del proceso anódico es igual a la del proceso catódico y por lo tanto corresponde al potencial  $E_{\text{corr}}$ . En el caso **a** estaremos en presencia de disolución general (corrosión uniforme), en el caso **b** en estado de pasividad y en el caso **c** se producirá corrosión localizada para ese metal en el medio analizado.

### 1.6.3 Polarización cíclica.

En esta técnica se aplica un barrido de potencial anódico, desde el potencial de corrosión  $E_{\text{corr}}$ , hasta el potencial al cual se alcanza el valor de corriente de  $4\text{mA/cm}^2$ , llamada corriente de reversa  $i_{\text{rev}}$ . En este punto el potencial se invierte barriendo en reversa (dirección catódica), hasta cruzar la curva anódica o hasta que la corriente tienda a cero. A este potencial se le llama potencial de protección  $E_{\text{prot}}$ , como se muestra en la figura 1.8.

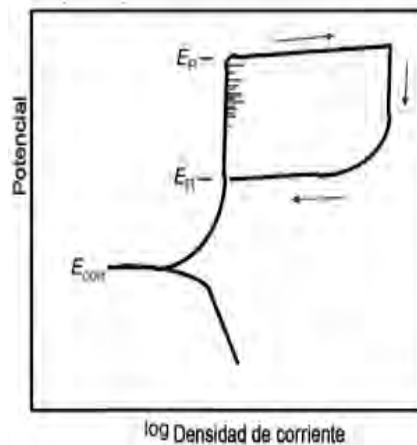


Fig. 1.8 Esquema de una curva de polarización que muestra el potencial crítico y la región metaestable de la picadura.  $E_p$  potencial de picado:  $E_r$  potencial de repasivación:  $E_{\text{corr}}$  potencial de corrosión.

### 1.6.4 Impedancia electroquímica

Un método para determinar la resistencia a la polarización de un metal es por medio de la impedancia electroquímica, esta técnica suele trabajar con una pequeña perturbación en corriente en número discreto de frecuencias, esta onda exhibirá una respuesta sinusoidal fuera de fase con el potencial aplicado y tiene una amplitud que es inversamente proporcional a la impedancia de la



interfase. La impedancia electroquímica es una relación entre la excitación y la tensión de la señal que da como respuesta el sistema. <sup>(2)</sup>

La impedancia electroquímica  $Z$  es la dependencia que tiene el factor de frecuencia con la transferencia que establece la relación entre la excitación por la señal de voltaje aplicada y la respuesta del sistema en corriente.

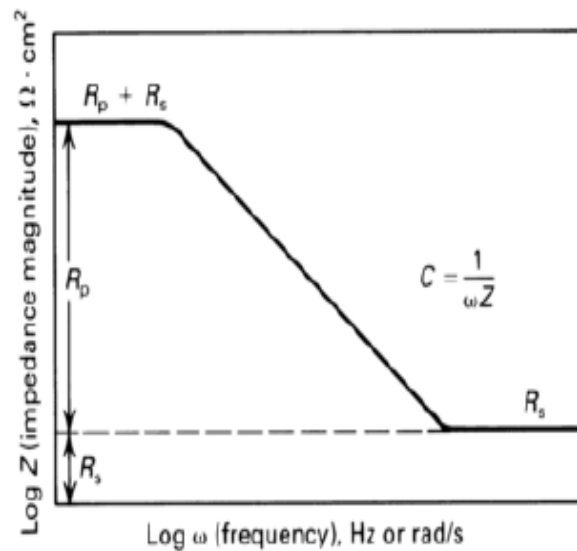


Fig. 1.10 Representación gráfica de un diagrama de Bode como son las pruebas que se realizaron en esta tesis <sup>(2)</sup>

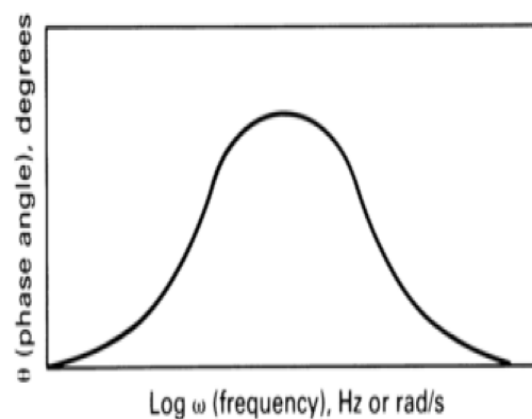


Fig. 1.11 Representación gráfica de un diagrama de Bode (ángulo de fase) como las pruebas que se realizaron en la tesis. <sup>(1)</sup>

**CAPÍTULO 2**  
**MÉTODO EXPERIMENTAL**

## 2.1 Corte y preparación de cupones

Se tomó una placa de aluminio comercial y se cortaron los cupones necesarios para hacer todos los experimentos, las medidas que se buscaron fueron de 2 x 2 x 0.2 cm ya que con esta medida se asegura la cobertura total del hueco de la celda tipo ventana en la que se trabajará. Se realizó el análisis químico de los cupones a través del Microscopio Electrónico de Barrido (MEB) por medio de Energía de Dispersión de Rayos X(EDS) mostrando los siguientes valores.

Composición química y espectro:

Tabla 1. Composición química de aluminio comercial.

Elem	Wt	%
Al	93.50	93.74
Si	6.50	6.26
Total	100.00	100.00

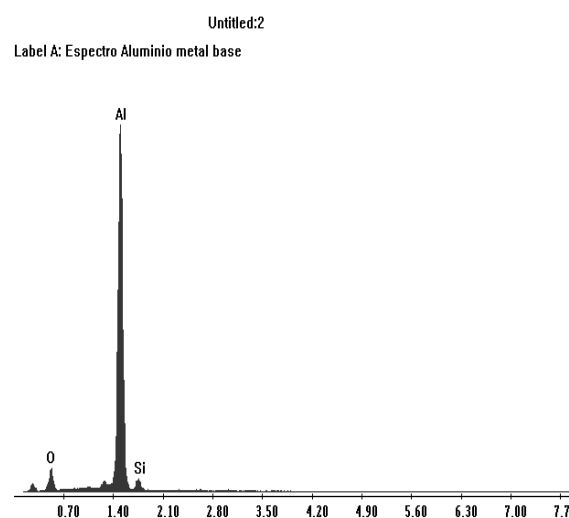


Figura 2.1.1 Espectro del aluminio puro comercial

## **2.2 Preparación de superficies**

Primero se desengrasaron los cupones, esto se realiza simplemente lavando con una solución de agua y jabón, se retira y se enjuaga con agua destilada, todo esto utilizando pinzas para no volver a engrasarlos con el contacto de las manos.

Después se secan con acetona que también sirve como desengrasante y así las piezas están listas para ser tratadas químicamente.

Para el caso de los cupones que van a ser anodizados antes de ser desengrasados y secados primero son preparados con lija 600 y después con lija 1200 para poder tener una mejor morfología de la superficie de la capa de óxido que se adhiere por la pasivación del aluminio.

## **2.3 Tratamiento Químico con agua oxigenada**

Para realizar el tratamiento una vez preparados los cupones, estos se sumergieron en agua oxigenada a diferentes concentraciones por 10 minutos. El tiempo se tomó basado en los estudio anteriores de tratamiento de conversión química con tierras raras, pasado este tiempo se retira y se seca con acetona, ya que si se seca con papel se marca el grabado del papel, esto se debe a que la capa que se forma al estar todavía húmeda adquiere la forma del grabado como si se le hiciera un estampado y esto podría ocasionar problemas en la homogeneidad de la superficie.

## **2.4 Anodizado**

Después de hacer la preparación de la superficie del aluminio se coloca en un vaso de precipitados una solución de ácido sulfúrico al 18% en peso y se conecta la placa de aluminio con unos caimanes a una fuente de poder y un multímetro para saber exactamente el amperaje aplicado, en el ánodo se conectó el aluminio y como cátodo se ocupó un placa de acero inoxidable 304L, se debe tener cuidado que los caimanes no toquen la solución ya que si

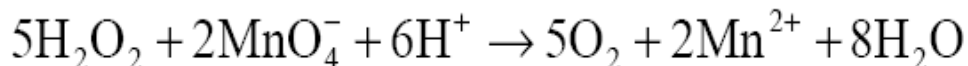
es así se puede correr el riesgo de que los caimanes se deterioren y contamine la solución haciendo menos eficiente el anodizado.

Se hacen los siguientes cálculos: Se conoce por experiencia de prácticas realizadas en la carrera que para 1 cm<sup>2</sup> de aluminio con una solución de 18% en peso de ácido sulfúrico se necesitan 15mA/cm<sup>2</sup> por lo tanto si el cupón que se va a anodizar tiene como área 4 cm<sup>2</sup> se necesitan 60 mA,

Se deja una hora en la solución para que se anodice, retira y se sumerge en agua a punto de ebullición por una hora para sellarlo.

## **2.5 Determinación permanganimétrica de peróxido de hidrógeno.**

El H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> contenido en la muestra reacciona, en solución ácida, y se titula con una disolución de permanganato de potasio de acuerdo con la siguiente ecuación:



Al principio la reacción es lenta, pero después de que se haya formado una pequeña cantidad de sal manganosa se produce la reacción de una forma casi instantánea.

En esta titulación no es necesario el uso de indicador, ya que la aparición de un color rosa indica cuando hay un exceso del reactivo valorante (permanganato).

### Reactivos

- Disolución de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1/5 (v/v) mL.
- Disolución de KMnO<sub>4</sub> 0.1N.

## Procedimiento

- Se pesa exactamente (en balanza analítica) entre 2 y 3 gr. de la muestra de agua oxigenada comercial y agua oxigenada analítica
- Transferir la muestra a un matraz aforado de 250 mL y aforar con agua destilada.
- Pipetear 25 mL de la disolución anterior en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- Agregar 10 mL de ácido sulfúrico 1/5 (v/v).
- Adicionar, gota a gota y con agitación, la disolución de  $\text{KMnO}_4$  0.1N hasta el primer tinte rosa permanente.
- Anotar el volumen  $V_1$  (mL) gastado.
- Repetir la valoración al menos una vez más.
- Calcular el % de  $\text{H}_2\text{O}_2$  en la muestra según la ecuación:

$$\% \text{H}_2\text{O}_2 (\text{p} / \text{p}) = \frac{V_1 \times N \times F \times E_q}{1000} \times \frac{V_0}{V} \times \frac{100}{a}$$

Siendo:

$V_1$  = mL consumidos en la valoración.

$N = 0.1$ .

$F$  = factor de la disolución valorante.

$V_0$  = volumen al que se diluyó la muestra (250 mL).

$V$  = volumen utilizado para la valoración.

$a$  = gramos de muestra pesados para el análisis.

$E_q$  = peso equivalente del  $\text{H}_2\text{O}_2 = \text{PM}/2 = 17.0$ .

## 2.6 Pruebas electroquímicas.

Se debe mencionar que todas las pruebas se hicieron por triplicado para cada material a diferentes condiciones, con el mismo electrolito de cloruro de sodio al 3 en cloruros y el mismo tamaño de ventana de 1 cm de diámetro.

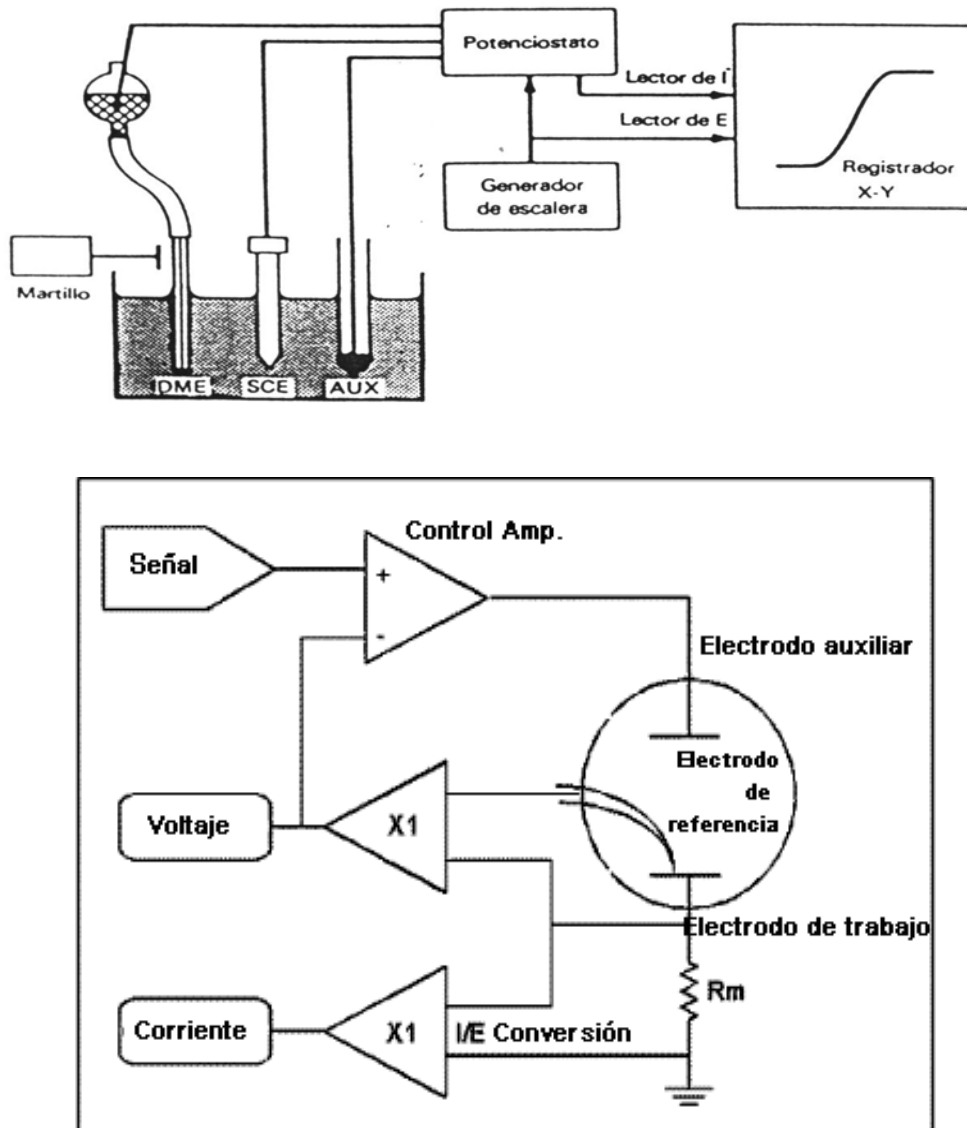


Fig. 2.6.1 Esquemas simplificados donde se muestra como se conecta el sistema

Tabla 2 Variables y condiciones de las pruebas.

Concentración H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Tiempo de tratamiento	Tiempo de estabilización máximo
30 Vol.	10 minutos	15 minutos
11 Vol. (comercial)	10 minutos	15 minutos

### 2.6.1 Potencial vs. Tiempo

Se realizaron pruebas para obtener curvas de potencial contra el tiempo con ayuda del equipo GillAC. Se colocaron los cupones de aluminio tratado químicamente a diferentes concentraciones de agua oxigenada como se explicó anteriormente.

Las placas son colocadas en una celda y para poder realizar el registro de las mediciones se ocupó un electrodo de calomel como electrodo de referencia ( $E_{Ref}$ ) y como electrodo auxiliar se tomó una barra de grafito. Se sumergieron en una solución de NaCl y se registró el potencial por 15 minutos tomando un valor cada 5 segundos para analizar a qué tiempo se estabiliza el potencial de reposo del metal en el electrolito y así poder realizar las otras pruebas con un tiempo conocido de estabilización.

### 2.6.2 Resistencia a la polarización ( $R_p$ )

Esta técnica electroquímica se realizó para conocer la resistencia del electrolito con el material, y una vez obtenidas las curvas se calculó el valor de  $R_p$  o resistencia a la polarización para conocer velocidades de corrosión instantáneas. Se colocaron los cupones de igual forma que en la prueba anterior con el mismo electrolito y se dejó estabilizar 15 minutos y después se le aplicó un sobrepotencial de  $\pm 20$  mV con respecto al potencial de corrosión, primero en sentido catódico y después en sentido anódico, para obtener una línea recta para poder así calcular el valor de  $R_p$  que es la pendiente de esta curva y a partir de este valor calcular también la velocidad de corrosión instantánea.

El valor de  $R_p$  fue calculado de la siguiente forma



$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta i} = \frac{V}{A/cm^2} = \frac{V * cm^2}{A} = \Omega * cm^2$$

### **2.6.3 Curvas cíclicas.**

Ya determinada la concentración óptima, se empezó con la comparación de resistencia de la película pasiva formada en el aluminio por el tratamiento químico contra un aluminio anodizado y a su vez comparar estas dos con el aluminio desnudo. Esto se hizo a través de curvas de polarización cíclica, donde se puede observar si el material se ve afectado por picaduras en un electrolito con alto contenidos de cloruros, como es una solución al 3% en cloruros. El barrido realizado fue de 600mV con una incremento de 6mV/ minutos, a partir de potencial de reposo.

### **2.6.4 Impedancia Electroquímica.**

Estas pruebas se realizaron también con respecto al tiempo en el mismo electrolito de 3% en cloruros (preparado con cloruro de sodio), esto quiere decir que se dejaba 15 minutos de reposo y se registraban los valores de resistencia que da la técnica de impedancia, después se dejaba reposar 30 minutos y se volvía a registrar valores y así sucesivamente hasta no ver un cambio relativamente grande de la prueba. Las condiciones de esta prueba fueron intervalos de 0.01 Hz a 10 kHz, es decir 6 décadas de frecuencia y un valor de amplitud de potencial de 10 mV. También se realizaron para todos los tipos de material y condiciones para poder hacer la comparación entre las películas pasivas del material.

Esta técnica servirá, en este trabajo, solamente para intentar determinar las características de la película de óxido de aluminio, pero no para determinar la  $R_p$ .

### 2.6.5 Inspección visual y análisis químico.

Una vez tratados los cupones con los diferentes tratamientos de conversión química se llevaron a análisis por medio del MEB a fin de caracterizar la película formada, así como el análisis químico del aluminio para saber su composición y determinar la composición de la superficie

### 2.6.6 Preparación de sustancias químicas

#### Acido sulfúrico al 18%wt

Como se requería un solución al 18% en peso se hizo la siguiente operación estequiométrica.

$$\rho_{H_2SO_4} = 1.84 \text{ gr} / \text{mL}$$

$$\frac{18 \text{ g}_{H_2SO_4}}{100 \text{ g}_{\text{solución}}} * \frac{1 \text{ ml}_{\text{reactivo}}}{1.84 \text{ gr}_{\text{reactivo}}} * \frac{100 \text{ g}_{\text{reactivo}}}{94 \text{ g}_{H_2SO_4}} = .104 \text{ mL}_{\text{reactivo}} / \text{g}_{\text{solución}}$$

Este cálculo se debe a que el ácido está a un 94% pero se tiene que considerar al 100% para corregir la concentración al 18% wt.

$$0.104 \text{ mL de reactivo} \quad \longleftrightarrow \quad 94\%$$

$$X \text{ mL } H_2SO_4 \quad \longleftrightarrow \quad 100\%$$

Se necesitan 0.11 mL de  $H_2SO_4$  por cada gramo de solución

Entonces para una concentración al 18%

Por lo tanto para una solución de 500 mL se necesitan 4.8913 g de solución para obtener una solución al 18%

#### Solución de 3 % en cloruros con cloruro de sodio.

Esta solución se hizo con NaCl y se realizó el siguiente cálculo.

$$\frac{30\text{grCl}}{1\text{solución}} * \frac{1\text{molNaCl}}{35.5\text{grCl}} * \frac{58.5\text{grNaCl}}{1\text{molNaCl}} = 49.43\text{gr NaCl}/\text{solución}$$

Para que cada litro de solución tenga 3% de cloruros se necesita poner 49.43 gr. de NaCl.

**CAPÍTULO 3**  
**RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

**Resultados.**

### 3.1 Titulación de agua oxigenada

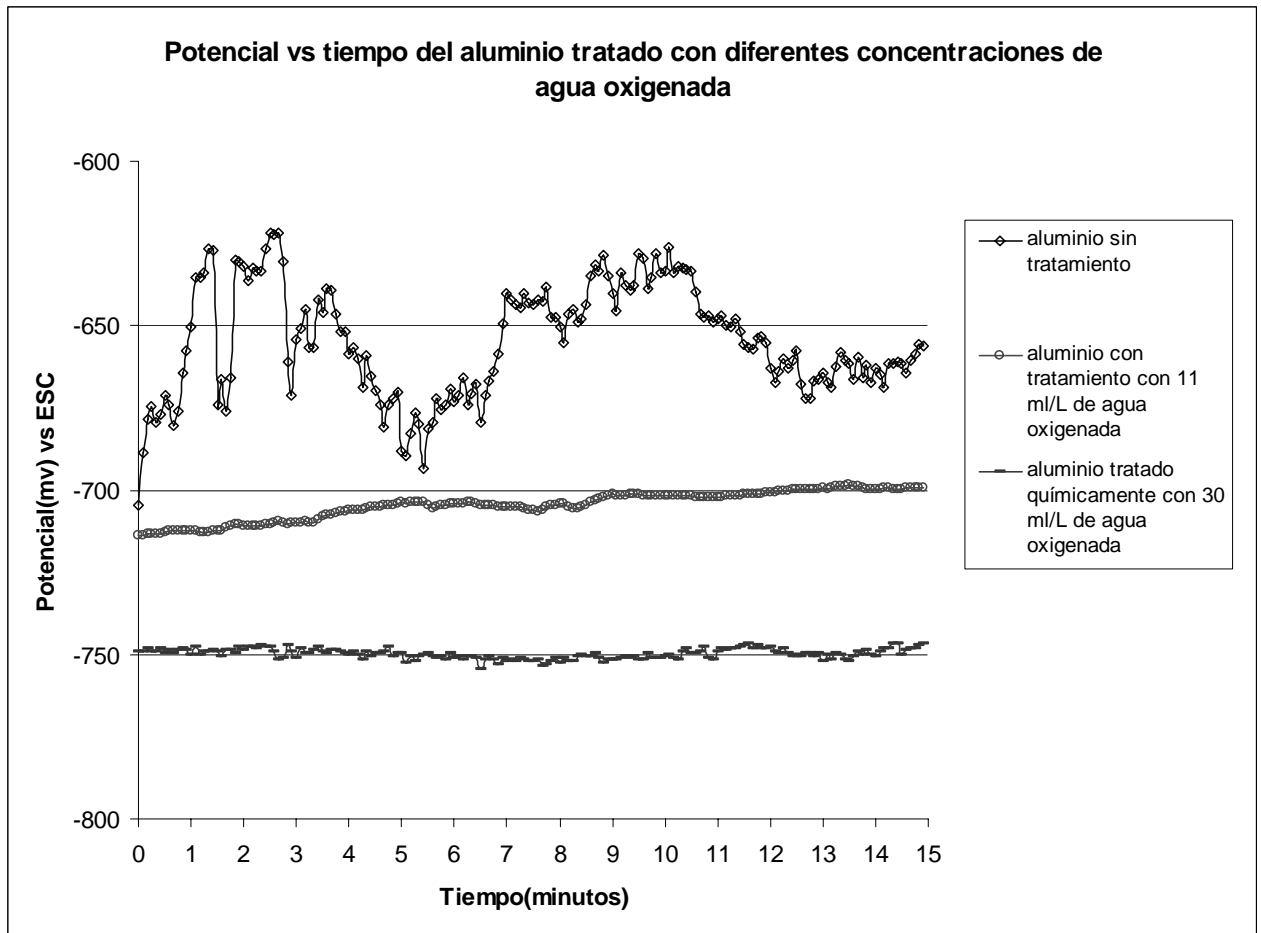
Para la titulación del agua oxigenada comercial y del agua oxigenada de composición analítica se realizaron las pruebas por triplicado y en la siguiente tabla se presentan solo promedios de los cálculos:

Tabla 3. Valores calculados a través de los volúmenes gastados de solución titulante.

Gr. de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Volumen gastado de solución titulante	% H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (p/p)
3gr de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 11 mL/L.	0.9mL	10.58
3gr de H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 30 mL/L.	2.5 mL	29.49

### 3.2 Potencial contra tiempo

En la gráfica 3.1 se muestran el potencial en función de tiempo para los tratamientos de conversión química. La línea superior muestra el aluminio desnudo sin ningún tratamiento, la línea media muestra la estabilización del tratamiento a 11 mL/L tratada por 10 minutos y la línea inferior muestra la pieza tratada por 10 minutos en 30 mL/L de agua oxigenada con el mismo tiempo de inmersión.



Gráfica 3.1 Potencial como función del tiempo en placas tratadas a diferentes concentraciones en comparación con el aluminio desnudo.

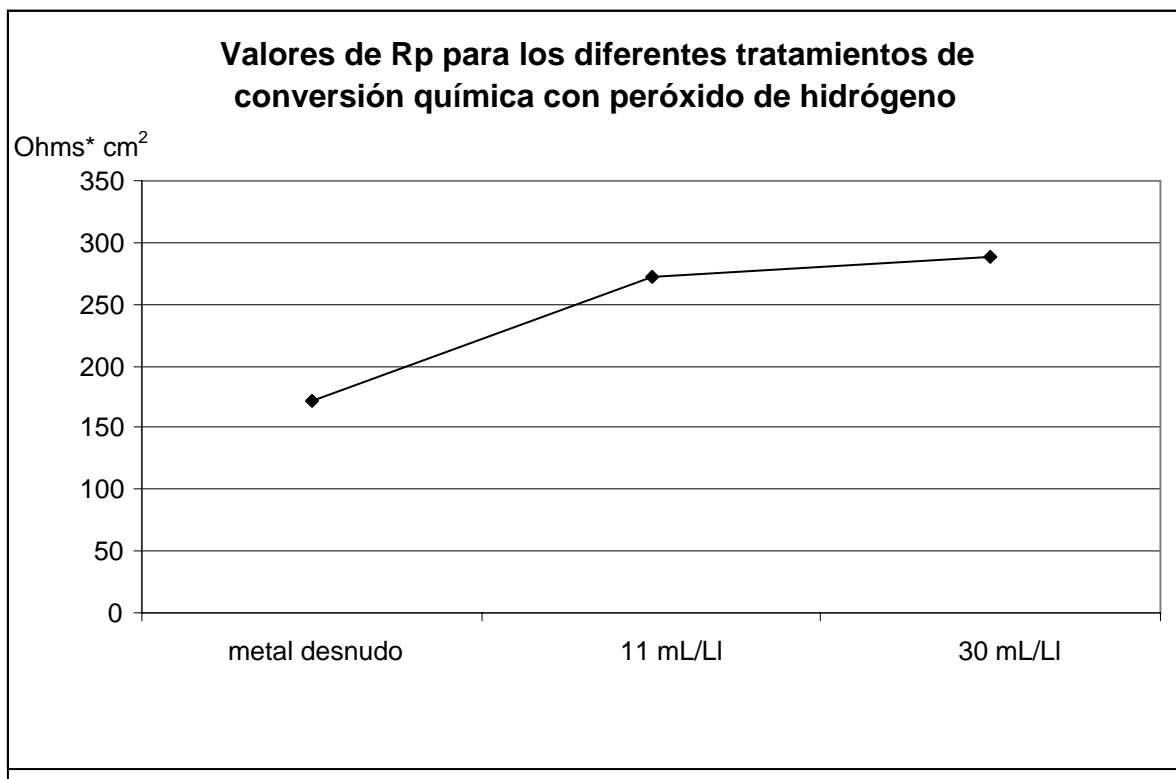
Esta prueba, que se usó para definir el tiempo de reposo que se iba a dar al aluminio tratado químicamente, se realizó en una solución de cloruro de sodio al 3% en cloruros que es la solución típica en la cual se pica el aluminio.

Como se puede observar el potencial de reposo se estabiliza mucho más rápido cuando se tiene la presencia del tratamiento con agua oxigenada que si se tuviera el aluminio desnudo, como se observó en este caso el potencial oscila demasiado, este se estabiliza hasta los 10 minutos, es por esto que se decidió que para todas las pruebas era necesario dejarlo 15 minutos indistintamente sin importa el material, ni qué tratamiento se le hiciera, para así no tener errores en la medición por no permitir que el potencial de reposo ( $E_{rep}$ ) se estabilizara.

Además se observó en esta prueba que el potencial de reposo disminuyó al aumentar los volúmenes de agua oxigenada, y esto se ve reflejado en las demás pruebas de este trabajo.

### 3.3. Resistencia a la polarización

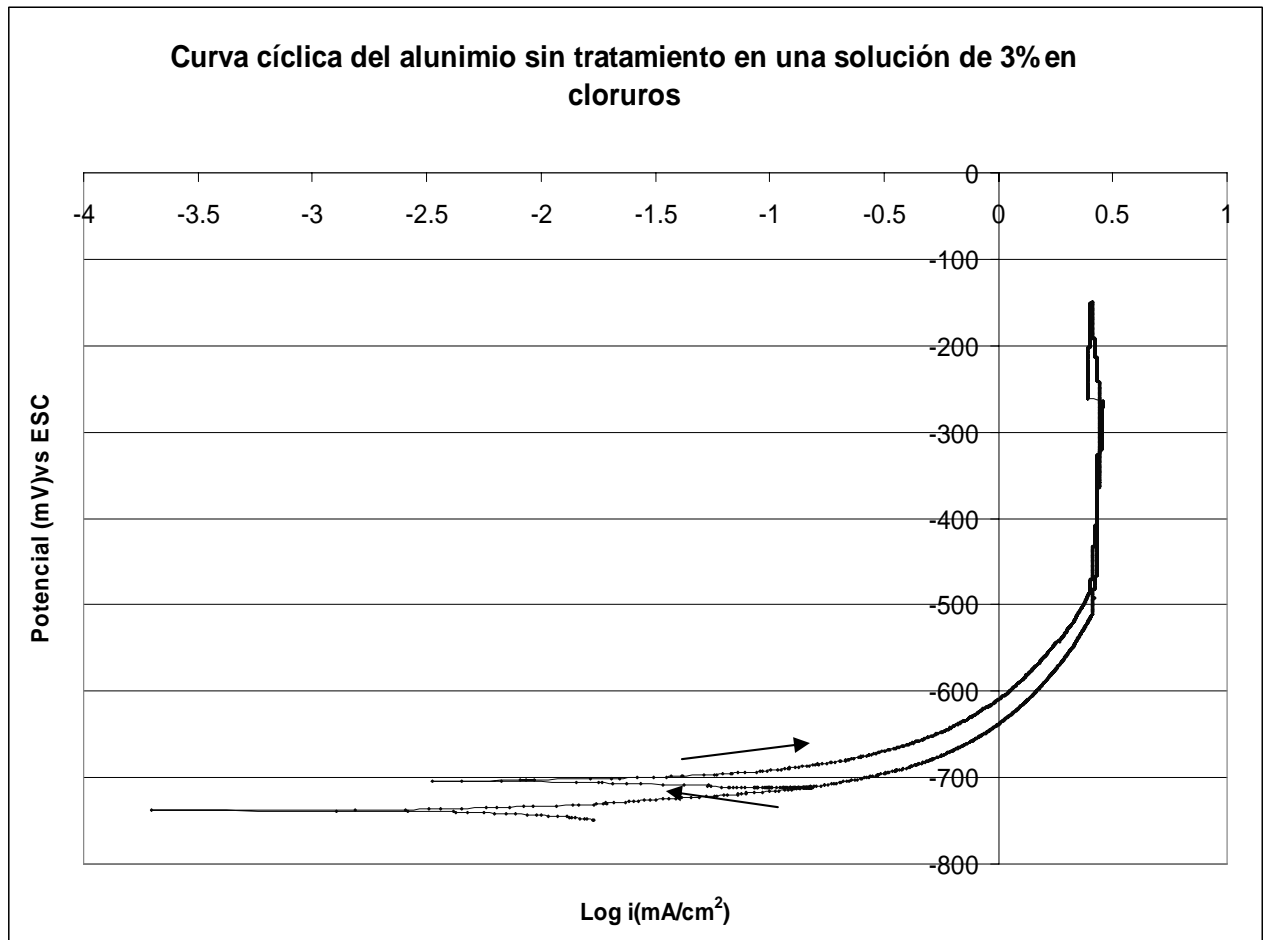
En la gráfica 3.2 se observa que al utilizar una disolución de agua oxigenada más concentrada como es la de 30 mL/L se aumenta la resistencia a la polarización un poco más que la de 11 mL/L y más con respecto al material desnudo, es por eso que se presentó la curva de la siguiente forma para que fuera más claro el cambio en el comportamiento de las mismas. Esta prueba se realizó en una solución al 3% en cloruros.



Gráfica 3.2. Resistencia a la polarización del aluminio tratado químicamente a diferentes concentraciones y la resistencia del metal desnudo en solución de cloruros al 3%.

Los valores del  $R_p$ , en  $\text{Ohm}\cdot\text{cm}^2$ , se encuentran en un intervalo de 170 a 280 y no varían mucho entre los 11 mL/L y los 30 mL/L pero se mejora de 268 a 280 y sí se incrementa, lo cual es directamente proporcional a que la tasa de corrosión disminuirá al aumentar la concentración del agua oxigenada.

### 3.4 Curva cíclicas



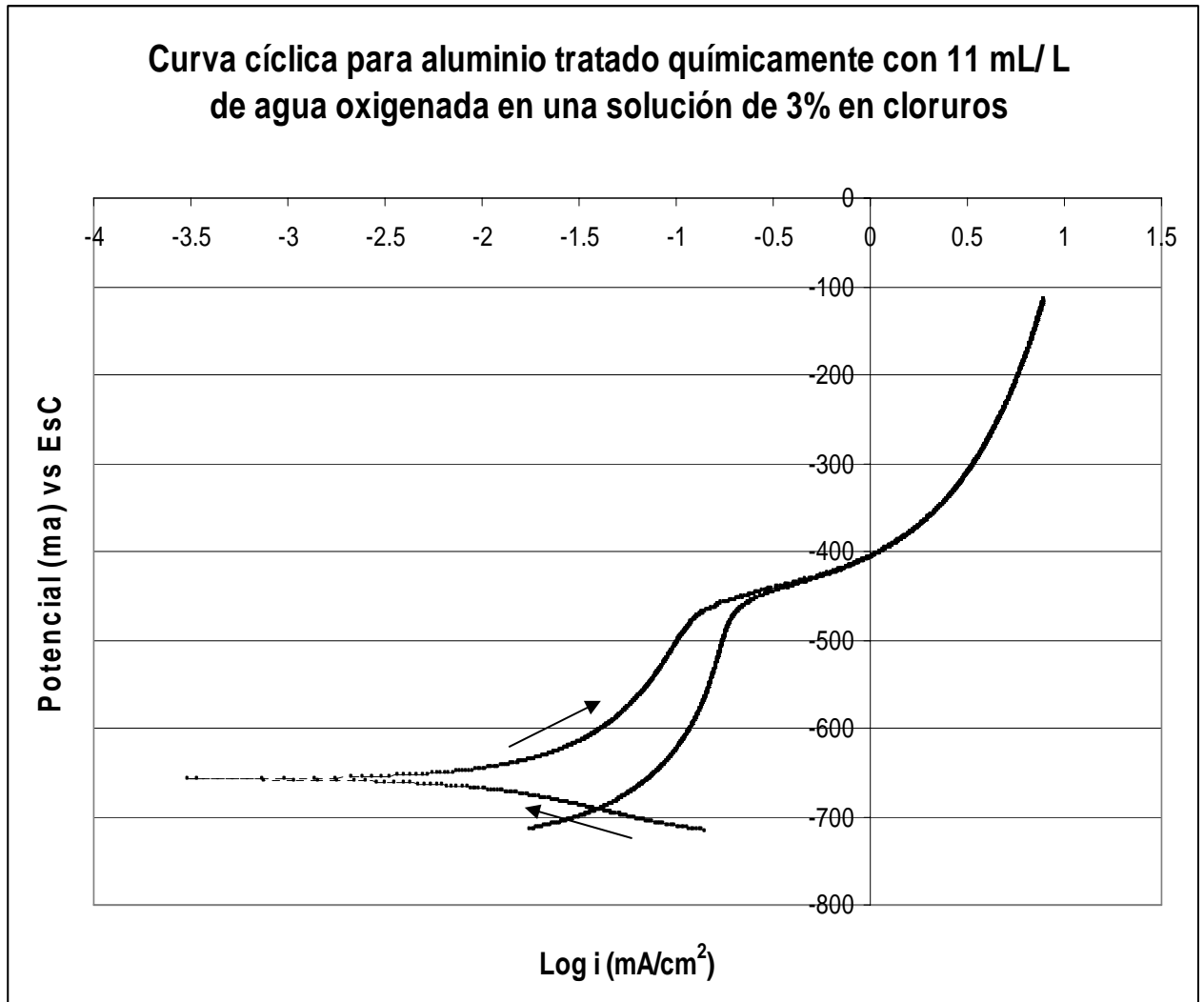
Gráfica 3.3.- Curva cíclica del aluminio sin tratamiento en una solución de 3% de cloruros

Se observa una curva típica de un comportamiento activacional que muestra cuando un material está sufriendo una degradación uniforme en toda la superficie del material. El potencial de reposo comienza en -760 mV.

Al estar el aluminio desnudo este se corroe uniformemente por lo que visualmente no presenta picaduras, como se puede observar la curva de regreso no pasa por el mismo lugar, es más, la salida de corriente aumenta lo



que nos indica que la superficie del material está presentando cierta resistencia a ser corroído pero ésta no es suficiente como para pasivarse, por lo que sufrirá corrosión localizada o tal vez mixta, aún si en este barrido no se hubiera apreciado visualmente.



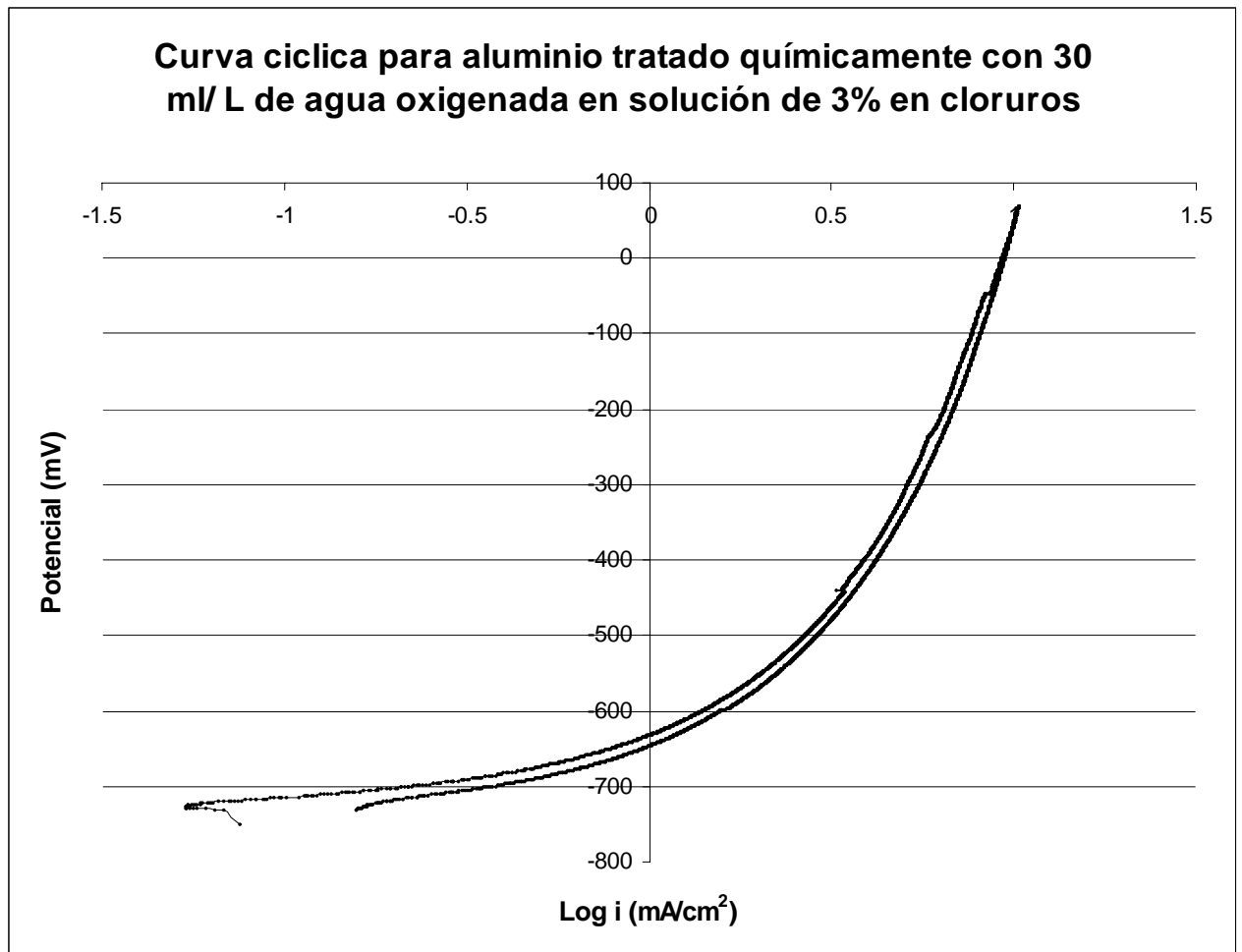
Gráfica 3.4.- Curva cíclica para un tratamiento químico de 11 mL/L de agua oxigenada en una solución de 3% de cloruros.

Se puede observar en la curva que el potencial disminuye en comparación con el metal desnudo, alrededor de 200 mV en dirección negativa, pero en los resultados de potencial contra tiempo el potencial no fue tan negativo como en esta prueba, esto hace pensar que la solución estaba vieja y por lo tanto afectó el potencial de reposo pero no la observación de resultados. Al principio al hacer el análisis, fue lo que sobresalió del análisis y por lo que

hubo dudas en cuál era la concentración óptima del tratamiento, ya que si el potencial se volvía más negativo entonces el material presentaba mejor protección y la salida de corriente debería de disminuir por efecto de un mejor tratamiento, pero como se observa en la curva la salida de corriente aumenta y al hacer la inspección visual, el material se veía más dañado con 11 mL/L que con 30 mL/L y es por esto que se llegó a la conclusión que la solución estaba vieja.

También hay que tener en cuenta que el agua oxigenada con 11 mL/L es de tipo comercial, es decir, de la que se vende en farmacias, de tipo curación y aunque se garantizó con la titulación los volúmenes de la misma solución no se garantiza que esta solución no contenga otros químicos que puedan alterar los resultados.

La curva muestra una pequeña formación de una capa pasiva que después se rompe ya que disminuye la salida de corriente pero después se vuelve a aumentar favoreciendo la disolución del material uniformemente por lo que no presenta picaduras ya que la capa formada no es tan resistente para provocar que solo se rompa por algunos puntos, se concentren los cloruros y se haga una celda, solo provoca que el material se proteja momentáneamente y después se corroe uniformemente como si el material estuviera desnudo otra vez.



Gráfica 3.5.- Curva cíclica de un aluminio tratado químicamente con 30 mL/L de agua oxigena en una solución de 3% de cloruros

Para poder comparar los dos tratamientos químicos se realizaron las pruebas en las mismas condiciones. Como se puede observar en la curva 3.5 no se forma una capa pasiva, por lo que se debería aplicar un sobre potencial mayor o un barrido mucho más lento, pero esto implicaría que se tendría que realizar pruebas de este tipo a todos los materiales para tener una comparación entre la concentración de un tratamiento al otro.

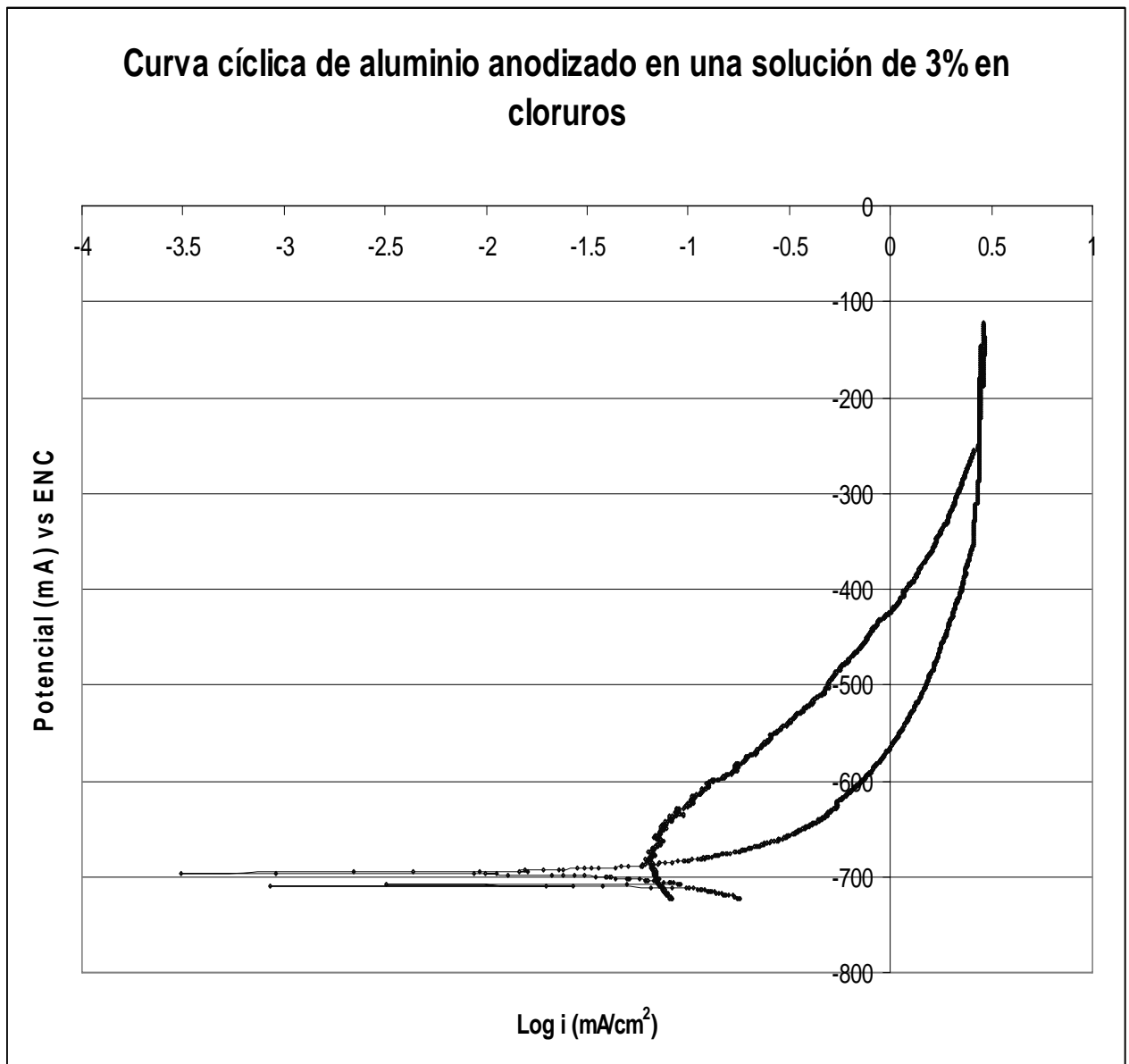
Cuando la curva regresa por el mismo camino o por un valor de corriente menor, el material no presenta tendencia a la corrosión localizada, es decir el incremento de corriente no se debe a la corrosión localizada, si no a alguna otra reacción anódica, ya que el área permanece constante. <sup>(19)</sup>

Otro análisis sería porque la curva regresa casi por el mismo lugar, y esto se

debe a que la morfología del aluminio fue lo que se modificó producto del tratamiento de conversión , en comparación con otro tratamiento con 11 mL/L que solo formó una pequeña capa pasiva que se rompe con el aumento de la corriente, aquí el fenómeno presente no es característico de pasivación, si no de activación del material, es por eso que la curva regresa casi por el mismo lugar ya que el material no pierde resistencia por la pérdida de material al aumentar la corriente.

Otra punto importante que se comprobó con la impedancia es que la capa pasiva se forma por el contacto del agua oxigenada en función del tiempo, por lo que el material podría sufrir corrosión que menguaría a través del tiempo. Al parecer la capa se forma de manera casi instantánea y alcanza su resistencia máxima en breve tiempo. La modificación de este valor se podría deber a la adsorción y absorción de otras especies.

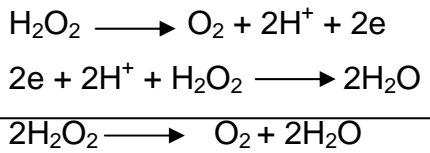
Otra teoría podría ser que el material está sufriendo cambios en la morfología lo cual sería como hacerle un pulido para tener una superficie más homogénea, el problema aquí sería que si, por ejemplo al material se le hiciera este tratamiento y después se le quisiera adherir una capa protectora, el tratamiento no serviría de anclaje para otro recubrimiento, ya que si la superficie es menos porosa el material que se quisiera sobreponer no anclaría por la deficiencia de rugosidad.



Gráfica 3.6.- Curva cíclica para aluminio anodizado en un solución de 3% de cloruros

Como se puede observar en esta curva 3.6 el aluminio anodizado se ve afectado por la solución de cloruros ya que se presenta un cruce, existe un potencial de picado ya que la curva ánódica cruza la curva catódica por lo que una vez que empieza el proceso de corrosión es posible detenerlo aplicando un potencial de protección,

Haciendo el análisis a detalle de las curvas ciclicas y tratando de explicar por que a mayor concentración de agua oxigenada el potencial disminuye, siendo que la lógica nos indicaría que si se está formando una capa pasiva por la oxidación como se muestra en la siguiente reacción



Si se presenta la reducción del oxígeno se asegura que el metal está sufriendo una oxidación por la alta concentración del mismo, pero los resultados muestran que la transformación de la superficie no es eficiente a 11 mL/L, aunque sí se modifica la superficie.

Por lo que si se formara una capa de óxido el potencial aumentaría negativamente y la salida de corriente disminuiría pero las curvas muestran que a 11 mL/L. de agua oxigenada la salida de corriente aumenta y el potencial es más negativo lo cual da una idea de que el material en sí no se está oxidando si no que se está cambiando la morfología de la superficie del metal como se muestra en el análisis de la superficie que se muestra a continuación, pero con 30 mL/L de agua oxigenada el potencial se vuelve más negativo y se disminuye la salida de corriente lo cual es indicativo de que el material sí presenta una capa pasiva y aparte se modifica la superficie del metal ya que la reacción que se está favoreciendo es la reacción en el metal. Un ejemplo de la literatura sería la figura 3.1

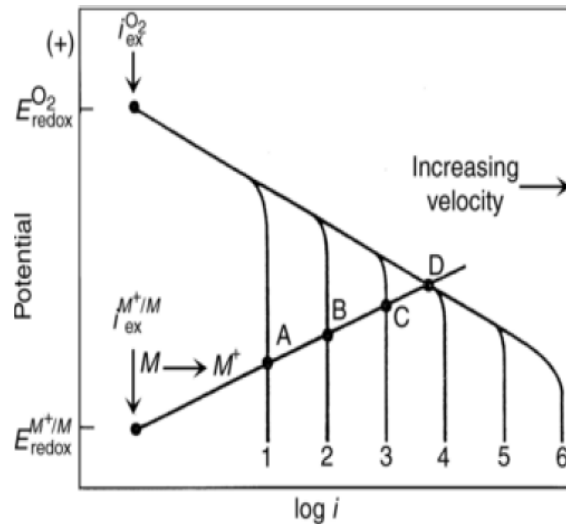


Fig. 3.1 Tomada de ASM para el análisis de los resultados<sup>(1)</sup>

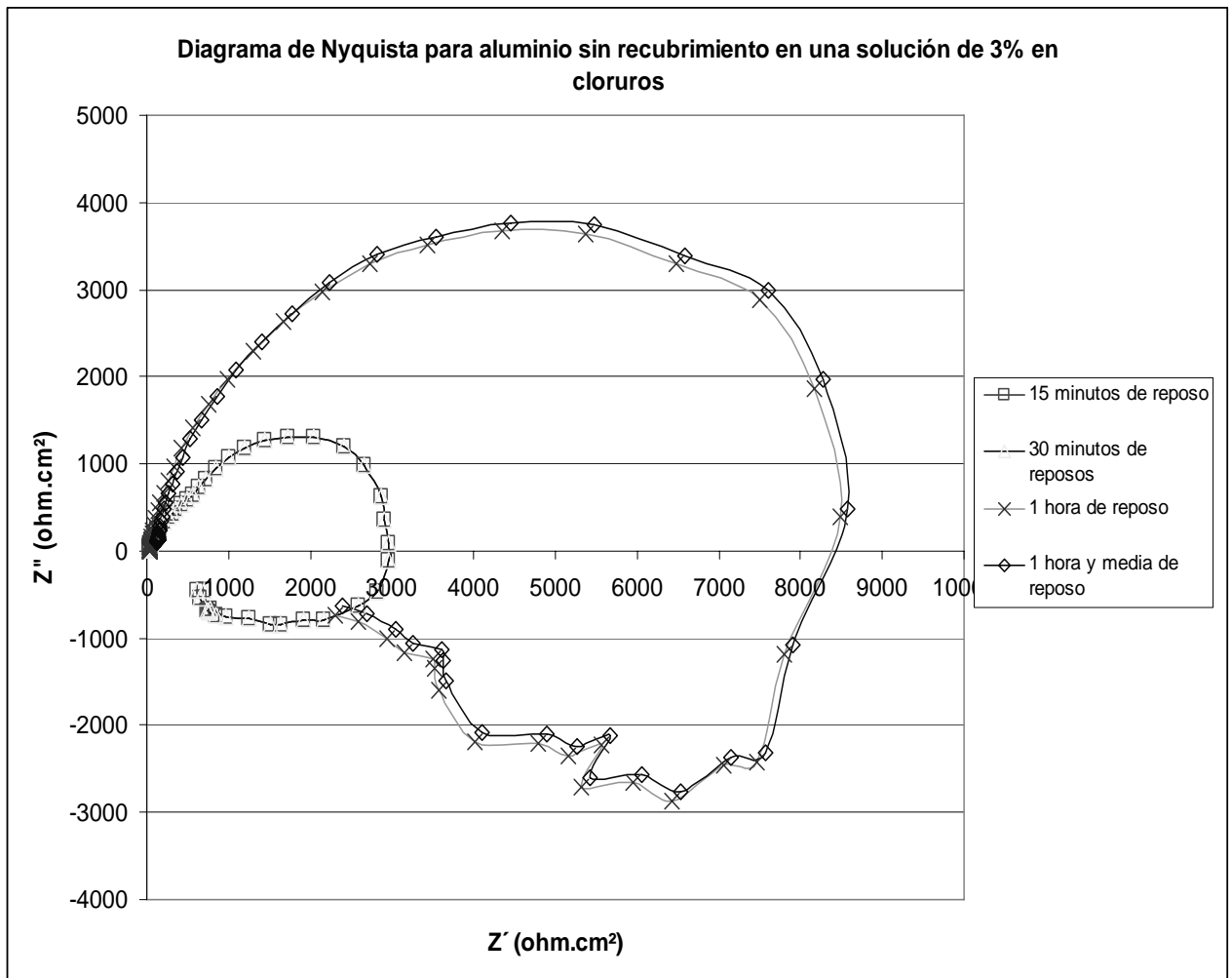
No se puede hacer una comparación realista sobre la resistencia de las películas pasivas ya que el aluminio anodizado presenta mejor resistencia; en lo que se podría hacer una comparación es en la aparición y la forma de las picaduras, las picaduras en el aluminio anodizado se presentan y no se desgasta uniformemente, a diferencia del aluminio con tratamiento químico en el cual las picaduras no se presentan en ninguna cantidad ni existe corrosión localizada pero como no existe un estudio para medir qué tanto se pica un material entonces se puede realizar inspección visual a través de las imágenes tomadas por el MEB (microscopio electrónico de barrido).

El tratamiento químico podría funcionar igual o mejor que el aluminio anodizado en un medio no tan agresivo, como con el que se hicieron las pruebas, pero esto tendría que comprobarse realizando más pruebas electroquímicas. La idea de este trabajo era comprobar si realmente existía una conversión química en el sustrato, por lo que no se probaron con muchos electrolitos.

### 3.5 Impedancia Electroquímica.

#### Aluminio sin recubrimiento con respecto al tiempo

Las curvas en la gráfica 3.7 muestran que la impedancia global aumenta en función del tiempo, lo cual es lógico ya que el aluminio sufrirá la formación espontánea de una capa oxidada simplemente por la inmersión en solución de cloruros al 3%. Estos iones impiden la formación eficiente de una película protectora.

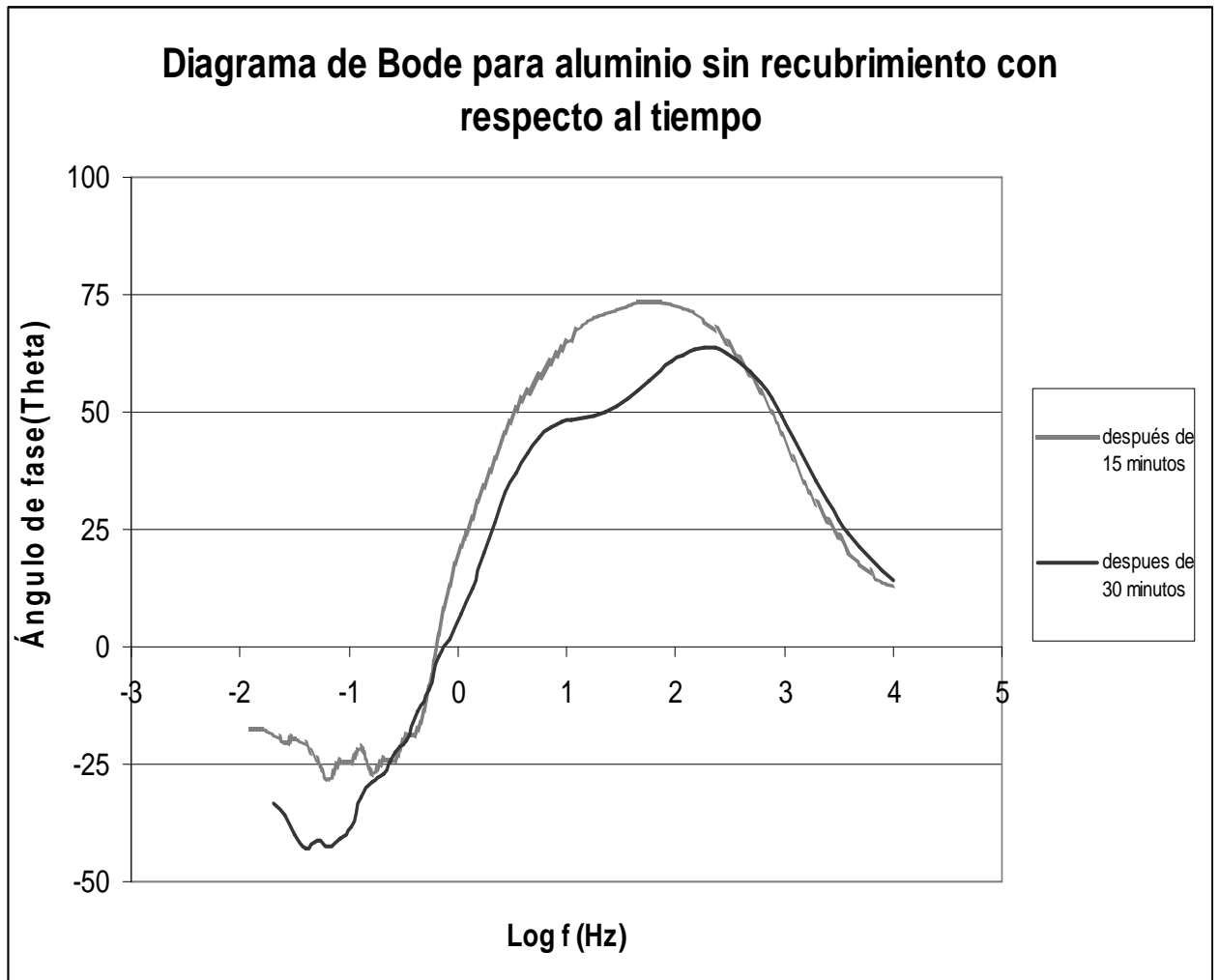


Gráfica 3.7.- Diagrama de Nyquist para el aluminio desnudo con respecto al tiempo

Se observa que el material aumenta la adsorción de los cloruros en la intercara del sustrato del metal ya que la resistencia como se observa en estas gráficas (3.7, 3.8) va disminuyendo por lo que aquí no existe ninguna



resistencia del metal a ser corroído.

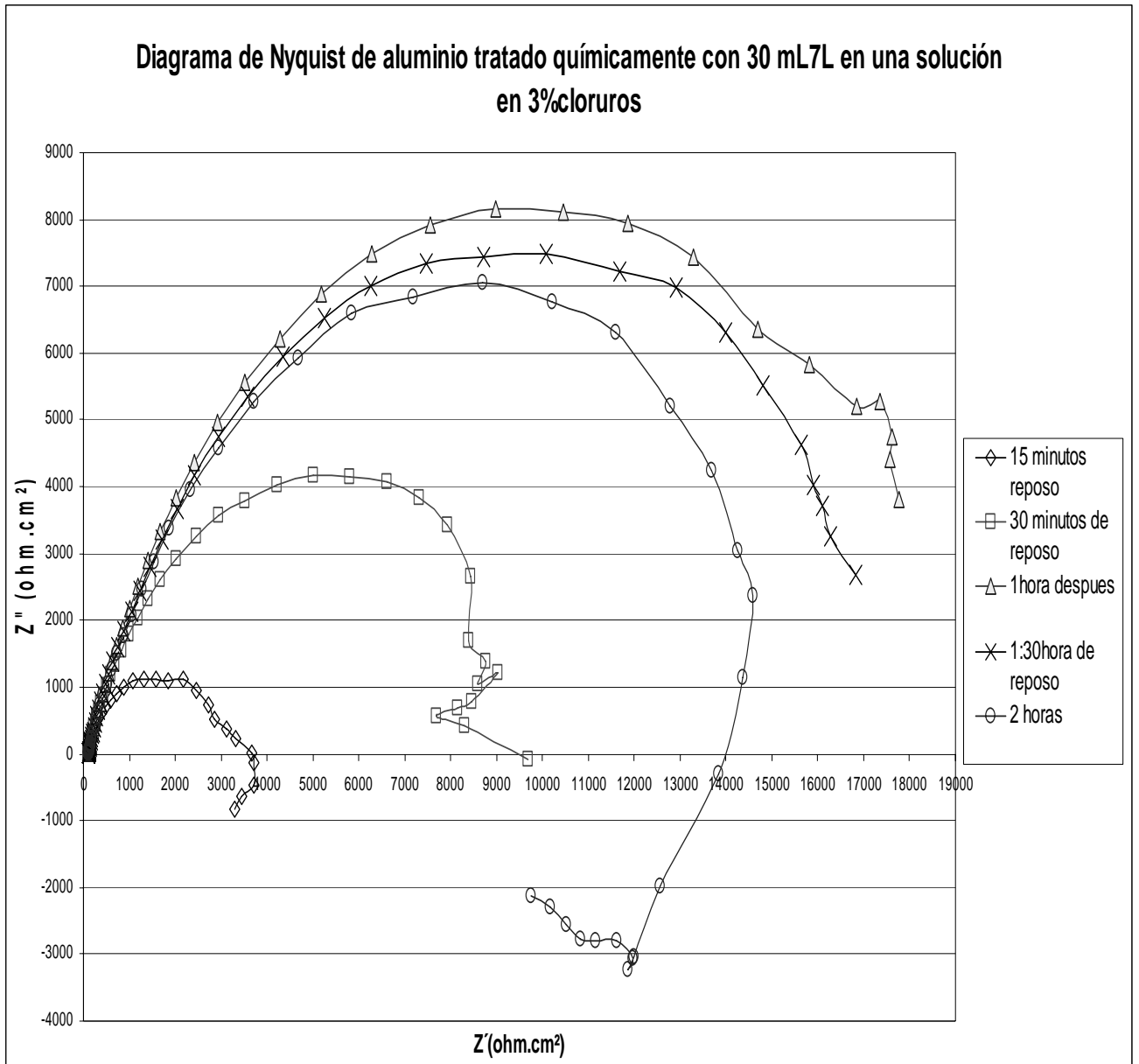


Gráfica 3.8.- Diagrama de Bode sin tratamiento en 3% de cloruros con respecto al tiempo

En la figura 3.8 se aprecia que a 10 y 30 minutos, los máximos en las curvas coinciden por lo que se puede considerar que los fenómenos son los mismo en ambos tiempos.

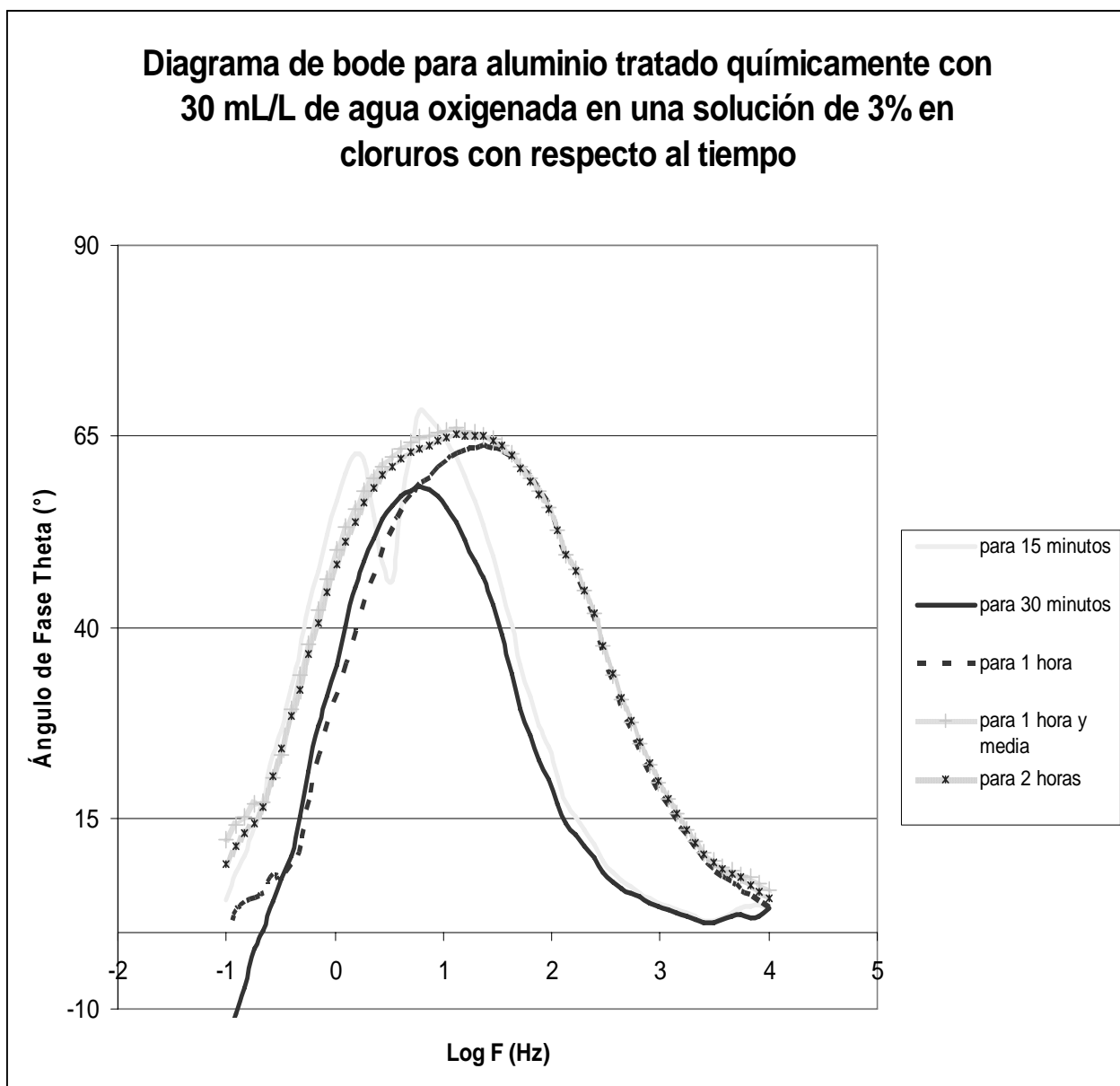
Ya que este tipo de prueba se maneja en bajo campo pero con cambio en la frecuencia los resultados aquí son más claros sobre el comportamiento de la capa pasiva, ya que la perturbación del sistema es pequeña en comparación con las otras pruebas electroquímicas que son realizadas en CD (corriente directa).

**Aluminio tratado químicamente con 30 mL7 L de agua oxigenada con respecto al tiempo.**



Grafica 3.9 Diagrama de Nyquist con 30 volúmenes en 3% de cloruros con respecto al tiempo.

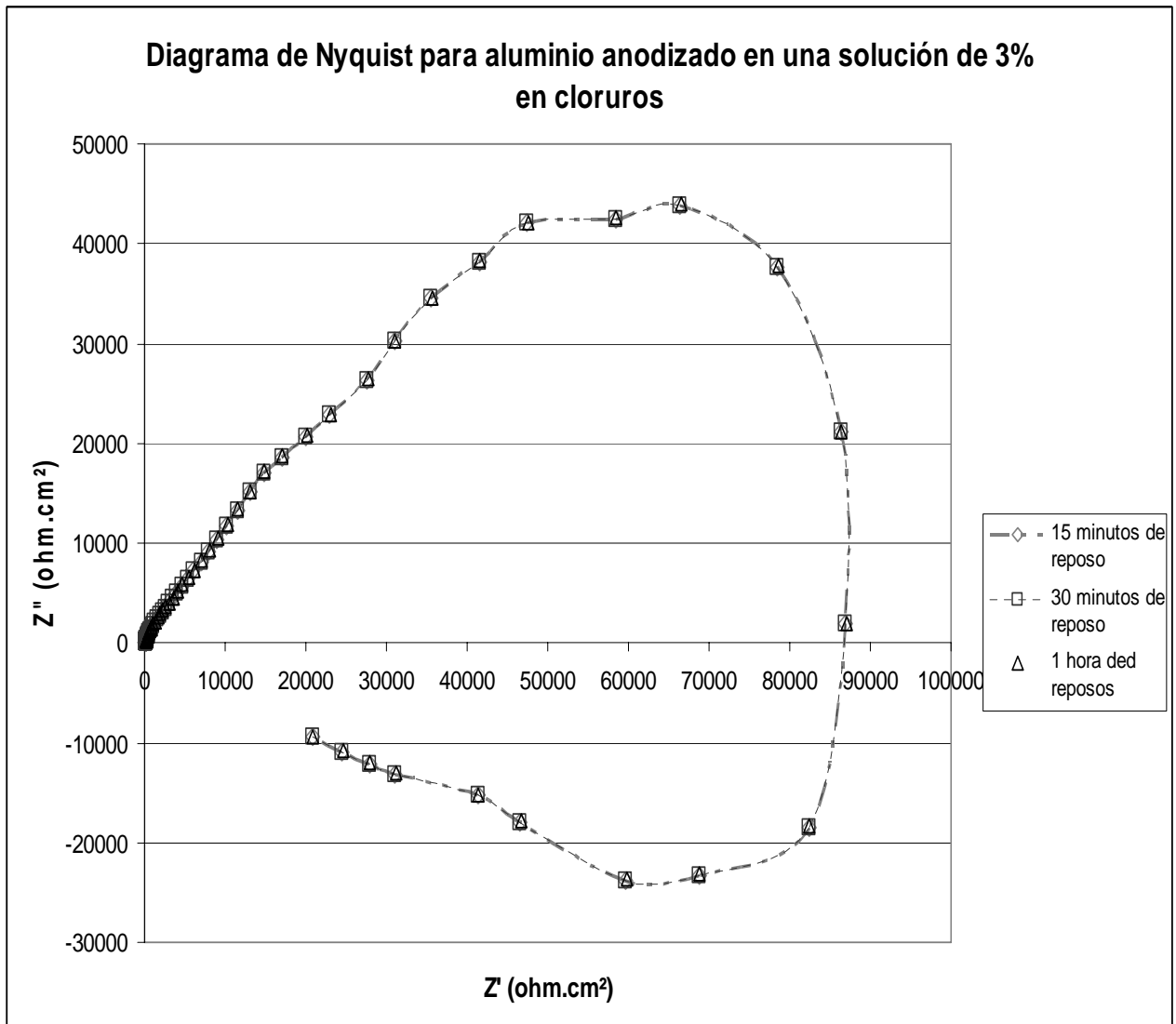
Esto da una idea de por qué los resultados en las curvas cíclicas, presentan un comportamiento activacional, ya que el tiempo de estabilización que se le dio antes de realizar la prueba fue de 15 minutos pues en las pruebas de potencial vs. tiempo el material se estabilizaba rápidamente.



Gráfica 3.10 Diagrama de Bode para aluminio en 30 mL/L de agua oxigenada en 3% de cloruros con respecto al tiempo.

En la grafica 3.10 se observa que a los 10 minutos se forma una capa, que después se estabiliza y provoca el aumento de la resistencia de la capa, a través del tiempo, como se puede observar en los diagramas de Nyquist. Después de una hora la capa empieza a perder resistencia y disminuye el ángulo de fase.

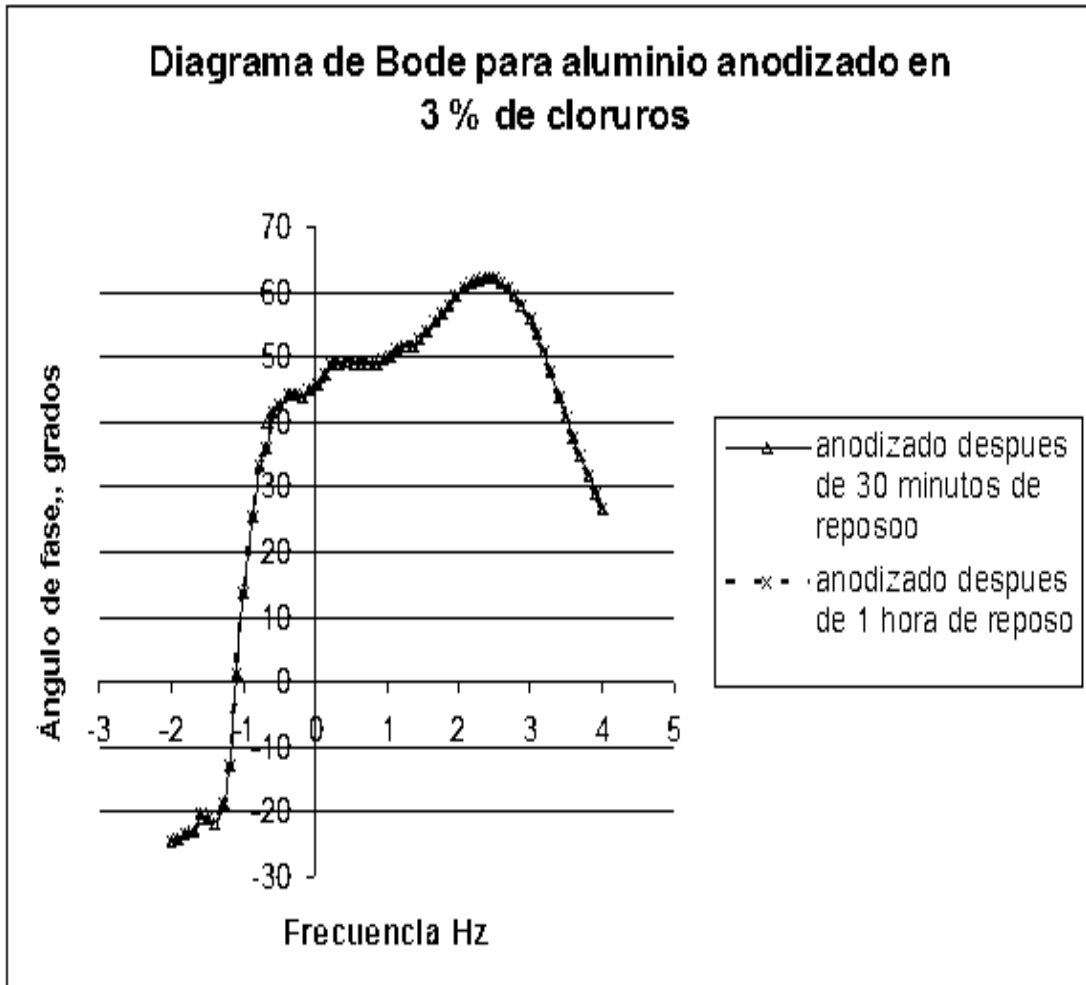
## Aluminio anodizado



Gráfica 3.11 Diagrama de Nyquist para un aluminio anodizado en una solución de 3% en cloruros con respecto del tiempo.

En la gráfica 3.11 se observa que la resistencia de la capa no se modifica con respecto al tiempo ya que en el aluminio anodizado se le realiza un sellado, lo que hace que la capa no necesite estabilizarse una vez que haya hecho contacto directo con el electrolito. Esto indica que la capa permanece con la misma resistencia a través del tiempo y que llegará un momento en el que se picará como en las pruebas anteriores pero le tomará más tiempo para que esto suceda.

Es por esto que la comparación entre el aluminio tratado químicamente y el aluminio anodizado en cuanto a estabilidad y resistencia son muy diferentes ya que los mecanismos y el comportamiento son diferentes. Como los resultados muestran la resistencia es 10 veces mayor y la estabilidad de la capa pasiva del aluminio anodizado no se modifica a través del tiempo.



Gráfica 3.13. Diagrama de Bode para un aluminio anodizado en una solución de 3% en cloruros con respecto de tiempo.

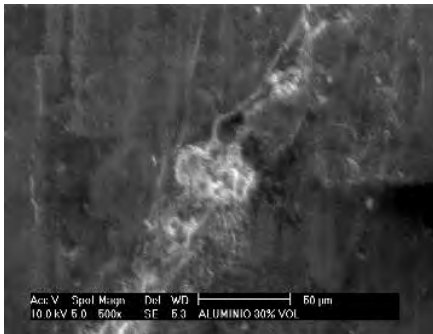
En los dos diagramas de las gráficas 3.12 y 3.13 se puede observar que la perturbación del sistema con respecto al tiempo no disminuye la resistencia de la capa sino que mantiene constante en un valor, esto indica que el anodizado protege mejor al aluminio; también se observa que la resistencia

de la capa es 10 veces mayor, por lo cual no podríamos hacer una comparación entre los dos tratamientos ya que el comportamiento es superior en el aluminio anodizado. Pero la pérdida del material en el tratamiento de conversión química es uniforme y menor por lo que el tratamiento no necesariamente es que sea malo simplemente no supera las cualidades de protección de un aluminio anodizado, pero sí previene que se corra el material en comparación de cuando está desnudo.

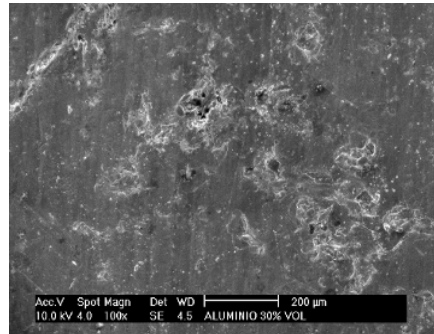
**Imágenes del MEB.**

Se tomaron la piezas que representaran mejor visualmente el fenómeno ocurrido.

- Aluminio tratado químicamente con 30 volúmenes después de realizar la prueba de curva cíclica. a 100X y 500X

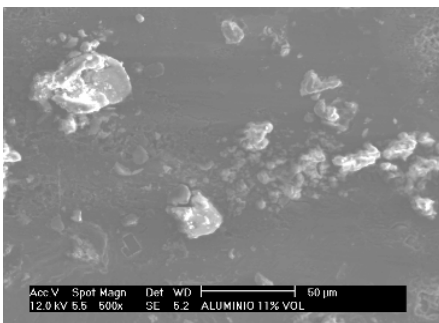


1) 500X

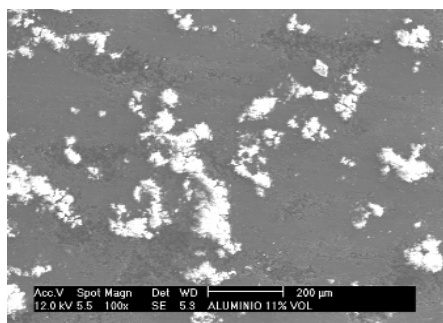


2) 100X

- Aluminio para 11 volúmenes a 100X y 500X, después después de realizar la prueba de curva cíclicas.

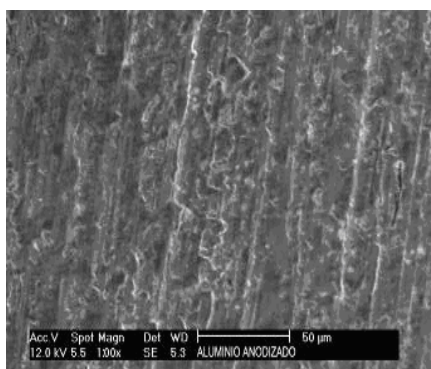


3) 500X

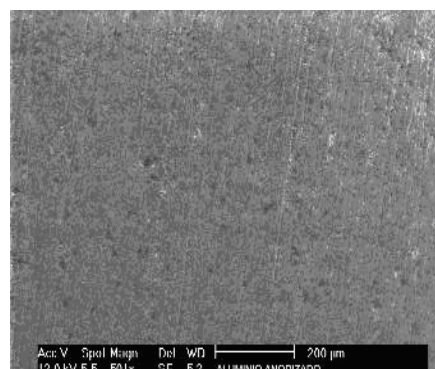


4)100X

- Aluminio anodizado para 100X y 500X, después de realizar la prueba de curva cíclicas.



5) 500X



6) 100X

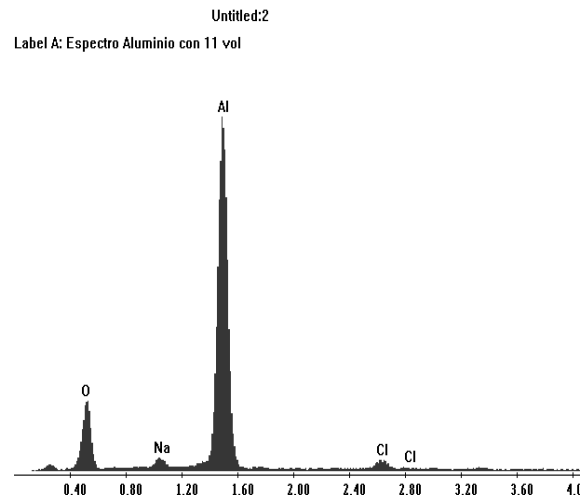
**Composición química:**

Se le realizó análisis químico a todos los cupones para poder comprobar si la capa formada por el tratamiento de conversión era resistente después de las pruebas o cuáles eran los residuos de las mismas, como sí había presencia de cloruros o presencia de alúmina, se realizó el análisis para saber que óxido o hidróxido se formaba en la superficie.

Este análisis se hizo solo a los cupones después de hacerles las pruebas de polarización cíclica ya que así podíamos observar realmente qué quedaba después de una corrosión extrema.

Aluminio con 11 mL/L después de tratamiento

Elem	Wt
Na <sub>2</sub> O	1.20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	91.19
Cl <sub>2</sub> O	7.61
Total	100.00



Como este análisis se hizo después de las pruebas se puede observar que el material no presenta alúmina y es por esto que se decidió por el otro tratamiento, ya que después de la prueba no existe presencia de ninguna capa y es por esto que el material presenta corrosión localizada (gráfica 3.4).

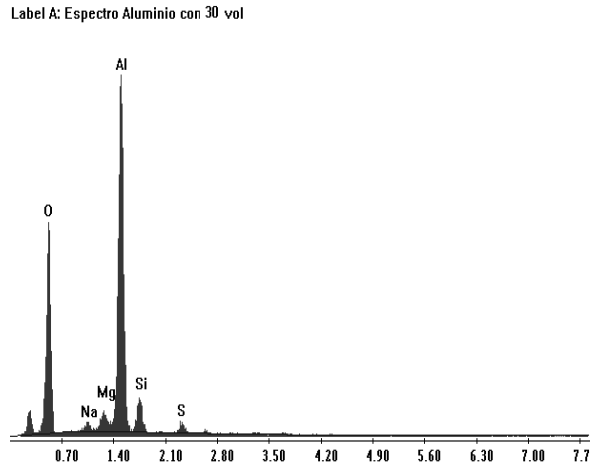
El cloro en este análisis fue muy abundante por lo que suponemos que este compuesto se reporta debido a que el software del MEB lo reporta de esta manera, pero se incluyó debido a que se presenta en el análisis pero no quiere decir que tengamos un óxido de cloro como tal presente en la superficie del sustrato.

Aluminio tratado con 30 mL/L de peróxido de hidrógeno.



Este análisis se midió en una parte donde habían quedado residuos del tratamiento.

Elem	Wt
Na <sub>2</sub> O	1.37
MgO	3.89
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	76.17
SiO <sub>2</sub>	12.81
SO <sub>3</sub>	5.77
Total	100.0



Este análisis indica que al material a parte de que se le adhirieron elementos como el sodio, el silicio que se obtuvo por el lijado de los cupones. Lo que más se obtiene es alúmina pues estos resultados indican que el tratamiento provoca que se oxide la superficie, por eso en las pruebas se observa que el material aumenta su resistencia ya que todo lo que está en contacto directo con ella promueve su oxidación y esto hace que la capa se vaya haciendo más uniforme y se establezca la resistencia a través del tiempo.

Como se dijo en un principio de este análisis, el tratamiento provoca un cambio en la morfología de la superficie y esto provoca que al momento de estar en presencia de una solución corrosiva absorba los elementos de la solución pero no para corroerla si no para formar una capa más estable y uniforme.

Composición química del aluminio anodizado después de las pruebas

Elem	Wt
CO <sub>2</sub>	21.69
Na <sub>2</sub> O	4.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.83
SiO <sub>2</sub>	41.53
Cl <sub>2</sub> O	1.03
K <sub>2</sub> O	3.90
Total	100.00

Como se puede observar el porcentaje más alto es el del silicio y esto se debe a que cuando se lijó el cupón se quedaron partículas de la misma lija que se adhirieron al momento de hacer el anodizado, pero también se observa una gran cantidad de alúmina y esto se debe a que se forma una capa muy fina al momento de hacer el anodizado. Los demás compuestos son los que se encuentran en la solución en la cual se hizo la prueba electroquímica

**CAPÍTULO 4**  
**CONCLUSIONES**

## CONCLUSIONES:

- El tratamiento químico modifica la morfología de la superficie del metal haciéndola menos porosa y más homogénea debido a la interacción con el agua oxigenada que libera oxígeno in situ.
- El tratamiento provoca que el potencial de reposo del aluminio se vuelva más negativo debido a que cambia la morfología superficial.
- A partir de la estabilización del Ecorr, se concluye que la concentración óptima del tratamiento de conversión química con peróxido de hidrógeno fue de 30 mL/L con inmersión de 10 minutos. Esto se corroboró por inspección visual después de las curvas cíclicas de polarización.
- El tratamiento con la concentración óptima evita que el material sufra picaduras estabilizando la capa de óxido en las condiciones estudiadas, sin embargo, el agua oxigenada no es un oxidante tan fuerte que permita la formación de películas pasivas de tipo industrial.
- El anodizado presenta la mayor resistencia a la polarización en comparación con el tratamiento químico planteado en esta tesis.
- La resistencia de la película pasiva en el tratamiento de conversión química alcanza un valor máximo a la hora de exposición con el electrolito pues la película se estabiliza. Tiempos mayores de exposición dañan la película quizá por incremento de espesor, pero presencia de adsorción de cloruros lo que resultará en corrosión por picaduras.
- El tratamiento de conversión química no presenta el mismo comportamiento que el aluminio anodizado, debido a que no presenta el

mismo tipo de corrosión, ni la misma resistencia, por lo que se puede suponer que el mecanismo de protección es distinto.

- La composición química de la superficie se modifica cuando existe un tratamiento de conversión química.

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros

- 1.- ASM Handbook vol.13 Corrosion, American society for metals, c1992
- 2.- Sato N (1978): The passivity of metals and passivating films, en passivity of metals(R.P. Frankenthal y J. Kruger, eds), p.29, The electrochemical society, New Jersey.
- 3.-Fontana M. G. y N.D. Greene, Corrosion engineering, Mc Graw Hill, Nueva York, 1978.
4. - J.O'M. Bockris and A.K.N. Reddy, *Modern Electrochemistry-2*, Plenum Press, 1970
5. - W.D. France, Jr., Controlled Potential Corrosion Tests: Their Application and Limitations, Mater. Res.
6. - D.D. MacDonald and M.C.H. McKubre, *Electrochemical Corrosion Testing*, STP 727, F. Mansfeld and U. Bertocci, Ed., American Society for Testing and Materials, 1981, p 110.
- 7.-E.Otero. Corrosión y degradación de materiales. Ed. Síntesis. 1997.
- 8.- U.R.Evans. Corrosiones metálicas. Ed. Reverté. 1987.
- 9.-H.H.Uhlig. Corrosión y control de corrosión. Ed. Urmo. 1979.
10. - R.W.Revie. Uhlig's corrosion handbook. The electrochemical Society. J.Wiley & Sons. 2000
- 11.- J. A. González. Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión. C.S.I.C. 1984.
- 12.- J. A. González. Control de la corrosión. C.S.I.C. 1989.

13.-S.Feliu y M.C. Andrade. Corrosión y protección metálicas. C.S.I.C. Nuevas Tendencias. 2 tomos. 1991.

14.- F.L.Laque. Marine corrosion. Causes and prevention. The electrochemical society. J.Wiley & Sons. 1975.

15.- J.M.West. Corrosión y oxidación. Fundamentos. Ed. Limusa. 1986.

16.- J.C.Scully. Fundamentos de la corrosión. Ed. Alhambra. 1988.

17.- D.A.Jones. Principles and prevention of corrosion. Prentice Hall. 1996.

18.- A.D.Mercer. Corrosion in seawater systems. Ellis Horwood. 1990.

19,. Editor: Juan Genescá Llongueras. Técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión. México D.F. Facultad de química , U.N.A.M., año?

### **Páginas de internet.**

20.-<http://www.textoscientificos.com/quimica/corrosion/tipos>

21.-[www.cideteq.mx/index/recubrimiento](http://www.cideteq.mx/index/recubrimiento)

22.[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec\\_6.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_6.htm)

23.- <http://www.ing.unlp.edu.ar/quimica/Clase%20N12.pdf>

### **Normas**

24.-"Practice for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements," G 59, *Wear and Erosion; Metal Corrosion*, Vol 03.02, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM.

25.-“Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from electrochemical Measurements,” G 102, *Wear and Erosion; Metal Corrosion*, Vol 03.02, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM.

26. - ASTM B 457 - Test Method for Measurement of Impedance of Anodic Coatings on Aluminum.

27. - ASTM G 46 - Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion.

28. - ASTM G 69 - Practice for Measurement of Corrosion Potentials of Aluminum Alloys.

29. - ASTM G 106, *Wear and Erosion; Metal Corrosion*, Vol 03.02, *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM.

30. - ISO 14713 - Protection against corrosion of iron and steel in structures -- Zinc and aluminium coatings.

31. - ISO 11845:1995 - Corrosion of metals and alloys -- General principles for corrosion testing

32. -ISO 11463:1995 - Corrosion of metals and alloys -- Evaluation of pitting corrosion



## APÉNDICE

**A:** Ampere; unidad utilizada para denominar intensidad de corriente.<sup>(1)</sup>

**Amplitud:** El valor máximo o mínimo de variación de una onda.<sup>(19)</sup>

**Anodizado:** Capas de óxido, obtenidas electroquímicamente, con un amplio rango de espesores, colores, grados de dureza, resistencia a la corrosión y propiedades ópticas y eléctricas.<sup>(16)</sup>

**Ánodo:** Elemento emisor de corriente eléctrica, es el electrodo en el cual ocurre el fenómeno de oxidación.<sup>(4)</sup>

**Ánodo Galvánico o de sacrificio:** Es el metal con potencial de oxidación más electronegativo que el ducto por proteger y que al emitir corriente de protección, se consume.<sup>(5)</sup>

**Capacitancia:** Es la propiedad que tiene un material dieléctrico situado en medio de dos conductores de almacenar electricidad cuando existe una diferencia de potencial entre los conductores.<sup>(1)</sup>

**Impedancia:** Es la oposición total de un circuito, cable o algún componente al paso de la corriente alterna. Este incluye a la resistencia y a las reactancias. La unidad de medida es el Ohm y su símbolo es la Z.<sup>(19)</sup>

**Cátodo:** Es el electrodo de una celda electroquímica en el cual ocurren las reacciones electroquímicas de reducción; en un sistema de protección catódica es la estructura a proteger.<sup>(4)</sup>

**Corriente alterna:** Es una corriente que periódicamente revierte la dirección del flujo de electrones. A la razón en la que un ciclo completo ocurre por unidad de tiempo (normalmente en un segundo) se le denomina frecuencia de la corriente.<sup>(19)</sup>

**Corriente directa:** Es la corriente eléctrica donde los electrones fluyen en una sola dirección. <sup>(19)</sup>

**Corriente de protección:** Es la magnitud de corriente directa necesaria para obtener los valores de potencial de protección de una estructura metálica enterrada y/o sumergida en un electrolito. <sup>(4)</sup>

**Corrosión:** Corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente. <sup>(1)</sup>

**Corrosión húmeda:** De naturaleza electroquímica, es decir que se caracteriza por la aparición de una corriente eléctrica dentro del medio corrosivo <sup>(7)</sup>

**Corrosión seca:** el ataque metálico que se produce por reacción química, sin intervención de corriente eléctrica. <sup>(7)</sup>

**Cromo hexavalente:** El cromo hexavalente del medio ambiente suele ser el resultado de aplicaciones como la fabricación de productos químicos, textiles y de cuero, además de la pintura para electrodeposición. <sup>(23)</sup>

**Densidad de corriente eléctrica:** Es la corriente que pasa a través de un área unitaria perpendicular a la dirección de la corriente. Su símbolo es  $j$  y la unidad de densidad de corriente es el amperio sobre unidad de área ( $A/m^2$  o  $A/cm^2$ ). <sup>(19)</sup>

**Electrodepósitos metálicos:** Recubrimientos metálicos obtenidos mediante procesos químicos o electroquímicos que le confieren al sustrato diferentes acabados y propiedades funcionales. <sup>(10)</sup>

**Electrolito:** Es un medio líquido ó sólido capaz de conducir corriente eléctrica por movimiento de iones, se refiere al terreno o al agua en contacto con un ducto metálico enterrado y/o sumergido. <sup>(4)</sup>

**Electrodo de referencia:** Es una media celda electroquímica cuyo potencial es constante, electrodo no polarizable. <sup>(19)</sup>

**FEM:** Fuerza electromotriz, es la diferencia de potencial producida por los generadores de corriente (Ánodos de aluminio en contacto con el acero al carbón en un electrolito), capaz de elevar las cargas eléctricas de un potencial a otro más alto. <sup>(7)</sup>

**Gradiente de potencial:** Es la variación en la lectura de potenciales, de positivo a negativo, que indica la presencia de áreas expuestas en la tubería o ánodos detectados, respectivamente. <sup>(12)</sup>

**KIC:** factor de intensidad de tensión crítico. <sup>(23)</sup>

**MEB:** Microscopio electrónico de barrido.

**Oxidación:** Es la reacción química a partir de la cual un átomo, ión o molécula cede electrones. Es la pérdida de los electrones de un átomo ó grupo de átomos de un metal, como producto de una reacción química en la que intervienen dos ó más elementos químicos. <sup>(3)</sup>

**Pasividad:** No todos los materiales metálicos y sus aleaciones se pueden considerar siempre susceptibles de corrosión, ya que existen algunos que, aun siendo activos bajo ciertas condiciones ambientales, pierden su reactividad química y en consecuencia se convierten en inertes. <sup>(8)</sup>

**Peróxido de hidrógeno:** El peróxido de hidrógeno se usa principalmente como un agente oxidante para muchos compuestos orgánicos e inorgánicos. <sup>(21)</sup>

**Polarización:** Es el tiempo de retardo ó duración de la reacción electroquímica a la

cual existe el intercambio de iones de un elemento metálico a otro en un medio electrolito. <sup>(1)</sup>

**Potencial de electrodo:** Es la diferencia de tensión entre una estructura metálica enterrada ó sumergida y un electrodo de referencia en contacto con el electrolito. <sup>(19)</sup>

**Potencial electroquímico:** Este es la SUMA del trabajo que se puede hacer por gradiente químico y el trabajo que se puede hacer por gradiente eléctrico.

**Protección anódica:** Se basa en formar una película protectora sobre metales por medio de corrientes anódicas aplicadas externamente.

**Protección cátodica:** Se hace suministrándole electrones a la estructura que se protege. Esto evita que se disuelva el metal. En el caso de tubería submarina ó sumergida, es una conexión eléctrica entre el ánodo y la tubería que hace las veces de cátodo, para evitar la corrosión, normalmente se hace por medio de ánodos de sacrificio tipo brazalete y son comúnmente instalados en combinación con un revestimiento anticorrosivo adecuado. Los ánodos son diseñados para una vida útil igual a la de la tubería. <sup>(14)</sup>

**Recubrimientos:** Proveen un escudo (pinturas, barnices, laqueadas) y son lo más común en protección. Hay que preparar la superficie para que la adherencia sea buena. <sup>(8)</sup>

**Recubrimiento Anticorrosivo:** Componente químico utilizado para proteger la superficie metálica externa de los ductos, protege las áreas desnudas y evita la fuga de corriente. <sup>(8)</sup>

**Reducción:** Es la ganancia de electrones de un átomo o grupo de átomos de un metal a otro, como producto de una reacción química en la que intervienen dos ó más elementos químicos. <sup>(15)</sup>

**Resistencia a la corrosión:** Capacidad del metal para resistir el deterioro causado por su exposición al medio ambiente. <sup>8)</sup>

**SCC:** Stress corrosion craking (corrosión bajo esfuerzos). <sup>(23)</sup>

$\sigma$  : Esfuerzo. <sup>(23)</sup>

**Tratamientos de conversión química:** Los recubrimientos de conversión son aquellos que se producen por efecto de una conversión química de la superficie de un sustrato metálico, y cuya finalidad es proteger al sustrato de la corrosión o modificar sus propiedades tribológicas o de adherencia. <sup>(6)</sup>

**Velocidad de corrosión (rapidez de corrosión):** Es la relación de desgaste del material metálico con respecto al tiempo, expresada generalmente en milésimas de pulgada por año (mpy). <sup>(16)</sup>