



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

Universidad Nacional Autónoma  
de México

Facultad de Ingeniería

---

“ESTUDIO Y CUANTIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN  
EN ACEROS DE REFUERZO Y GALVANIZADO”

T E S I S

Para obtener el grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Presenta:

IRVING JOB PEÑA JIMÉNEZ

Director de tesis:

Dr. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ

México D.F. 2014

## **Agradecimientos**

*A Carmen por ser una gran compañera de vida, a mi hijo Santiago por el tiempo que no le he dedicado durante la elaboración de este trabajo y por los gratos momentos que me ha hecho pasar*

*A mi madre por su bondad, paciencia y generosidad.*

*A mis hermanos a los que siempre he sentido a mi lado y a mis tíos Rosa Jiménez, Alfredo Cruz y Cándido Cruz que sin su apoyo no hubiese logrado alcanzar este ideal Profesional.*

*A mi asesor el Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez por su apoyo en todo momento y serenidad durante la elaboración de esta tesis.*

*A mi comité revisor Dr. Armando Ortiz Prado, Dr. Arturo Barba Pingarrón, Dr. Miguel Ángel Hernández Gallegos y al M.I. Carlos Alberto González Rodríguez por sus observaciones y comentarios que enriquecieron el trabajo presentado en esta tesis.*

## Resumen

En el presente informe de grado se exponen los resultados de la evaluación electroquímica que se realizó a un acero de refuerzo comercial (acero al carbono 1018) embebido en una pasta de cemento durante los 28 días de curado del cemento, teniendo tres superficies distintas en el acero de refuerzo. La primera superficie del acero de refuerzo evaluada es una superficie con óxido de hierro ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ); este tipo de óxido de hierro tiene un color muy característico el cual es negro. La segunda superficie que se tiene, es realizando un decapado al acero al carbono, el decapado deja completamente limpio de óxidos y grasas al acero al carbono. La tercera superficie es un recubrimiento de zinc, realizado por el proceso de galvanizado por inmersión en caliente.

La técnica electroquímica utilizada en la presente tesis es la resistencia a la polarización o polarización lineal ( $R_p$ ), la cual es muy útil y práctica para evaluar la corrosión teniendo probetas de acero embebidas en concreto u hormigón. Esta técnica ayuda a cuantificar la velocidad de corrosión que sufren las probetas de acero de refuerzo y así tener una estimación de la vida útil que tendrá el acero de refuerzo.

Se presentan también los resultados realizados a las probetas de acero galvanizado por inmersión en caliente, el acero galvanizado se presenta como una alternativa al acero al carbono comúnmente empleado como acero de refuerzo.

Al acero galvanizado se le realizaron pruebas de calidad, como es el ensayo de Preece, el cual indica donde se encuentra el espesor más delgado en el recubrimiento de zinc y también se realizó un ensayo de pérdida de peso el cual indica cuántos gramos de zinc por metro cuadrado tiene el acero.

La técnica de  $R_p$  se utilizó en el acero galvanizado en una solución poro, simulando un ambiente marino. Además, también se obtuvo la velocidad de corrosión del acero galvanizado en esta solución poro.

# Contenido

<b>Capítulo 1: Fundamento teórico.</b>	<b>5</b>
<b>1.-Definición de corrosión</b>	<b>5</b>
1.1.-Mecanismo de corrosión	5
<b>1.2.-Corrosión química</b>	<b>5</b>
<b>1.3.-Corrosión electroquímica</b>	<b>5</b>
1.3.1.-Clasificación de la corrosión electroquímica	6
<b>1.4.-Electrodos de referencia</b>	<b>10</b>
1.4.1.-Electrodo normal de hidrógeno	10
1.4.2.-Electrodo de calomelanos	12
1.4.3.-Electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl)	13
1.4.4.-Electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO <sub>4</sub> )	14
<b>1.5.-Técnicas electroquímicas</b>	<b>15</b>
1.5.1.-Técnica de Tafel	15
1.5.2.- Resistencia a la polarización o polarización lineal	17
<b>1.6.-Corrosión de las armaduras de concreto en ambiente marino</b>	<b>20</b>
1.6.1.- Componentes y estructura del concreto armado	21
1.6.2.-La corrosión del acero en el concreto	24
1.6.3.-Pasivación del acero en el concreto: el diagrama de Pourbaix	25
<b>1.7 Pérdida de alcalinidad. Carbonatación</b>	<b>28</b>
<b>1.8 Corrosión inducida por cloruros</b>	<b>30</b>
<b>1.9.- Aceros galvanizados</b>	<b>31</b>
1.9.1.- Acero galvanizado por inmersión en caliente	31
1.9.2.- Mecanismos de protección	36
<b>Capítulo 2: Metodología experimental</b>	<b>38</b>
<b>2.1.-Circuito galvanostático</b>	<b>38</b>
<b>2.2.-Muestras a ensayar</b>	<b>39</b>
2.2.1.-Aceros estudiados	39
2.2.2.-Preparación de las muestras	40
<b>2.3.-Descripción del proceso de resistencia a la polarización (Rp)</b>	<b>41</b>
<b>2.4.-Pruebas de calidad para el acero galvanizado</b>	<b>43</b>
2.4.1.-Localización del espesor más delgado en acero galvanizado o ensayo de Preece	43
2.4.2.-Práctica de g/m <sup>2</sup>	45
<b>2.5.-Probetas de pasta de cemento</b>	<b>46</b>
2.5.1.-Probetas de acero de refuerzo embebidas en cemento	46
<b>Capítulo 3: Análisis de Resultados</b>	<b>50</b>

<b>3.1.-Acero negro</b>	<b>50</b>
3.1.1.-Potencial de corrosión (mV vs ECS) del acero negro en los 28 días de curado	50
3.1.2.-Resistencia a la polarización (Rp) en el acero negro durante los 28 días de curado	52
<b>3.2.- Acero decapado</b>	<b>56</b>
3.2.1.-Potencial de corrosión (mV vs ECS) del acero decapado en los 28 días de curado	56
3.2.2.- Resistencia a la polarización (Rp) en el acero decapado durante los 28 días de curado.	58
3.2.3.-Potencial de corrosión (mV Vs $\text{Cu/CuSO}_4$ ) del acero decapado en los 28 días de curado	60
<b>3.3.- Acero galvanizado</b>	<b>63</b>
3.3.1.-Potencial de corrosión (mV vs ECS) del acero galvanizado en los 28 días de curado	63
3.3.2.- Resistencia a la polarización (Rp) en el acero galvanizado durante Los 28 días de curado	65
<b>3.4.- Esquema del diagrama de Evans</b>	<b>67</b>
3.4.1.-Esquema del diagrama de Evans del acero decapado.	67
3.4.2.-Esquema del diagrama de Evans del acero negro	68
3.4.3.-Esquema del diagrama de Evans del el acero galvanizado.	69
<b>3.5.-Obtención de la velocidad de corrosión</b>	<b>71</b>
3.5.1.-Velocidad de corrosión del acero negro y decapado	71
3.5.2.- Velocidad de corrosión del acero galvanizado	76
<b>3.6.- Solución poro.</b>	<b>80</b>
3.6.1.- Resistencia a la polarización (Rp) en solución poro de $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl al 3\%}]$ en el acero galvanizado por inmersión en caliente.	80
3.6.2.- Potencial de corrosión en solución poro de $[\text{Ca} (\text{OH})_2 + \text{NaCl al 3\%}]$ del acero galvanizado.	82
3.6.3.- Velocidad de corrosión del acero galvanizado en solución poro de $[\text{Ca} (\text{OH})_2 + \text{NaCl al 3\%}]$	84
<b>Conclusiones</b>	<b>86</b>
<b>Referencias</b>	<b>88</b>
<b>Anexos</b>	<b>90</b>

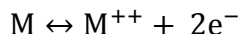
# Capítulo 1: Fundamento teórico.

## 1.-Definición de corrosión

Existe una tendencia por parte de los metales a volver a su estado natural en forma de óxidos, hidróxidos y sales. Por tal motivo “*corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su entorno*”, de modo que llega a afectarse la misión para la cual está diseñado. [Ref. 2, 8 y 18]

### 1.1.-Mecanismo de corrosión

Si en el equilibrio del metal con su ion y su electrón:



Se hace que el electrolito absorba los electrones, se destruye el equilibrio y los iones metálicos pasan a la solución. Esta reacción se seguirá produciendo mientras el medio siga absorbiendo electrones.

En función de cómo se realice esta transferencia de electrones se presentan dos tipos de corrosión:

- Corrosión química
- Corrosión electroquímica

### 1.2.-Corrosión química

En este tipo de reacción, hay una transferencia de electrones del átomo a un ion del medio exterior, pero sin transporte de electrones por el interior del metal. En el acero este tipo de corrosión se produce a elevadas temperaturas, a partir de los 600° C. Este tipo de corrosión no se abarcara en esta tesis.

### 1.3.-Corrosión electroquímica

La corrosión electroquímica o corrosión acuosa es un proceso espontaneo que denota siempre la existencia de una zona anódica, una zona catódica y un electrolito, es imprescindible la existencia de estos tres elementos, además de una buena unión eléctrica entre ánodo y cátodo, 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.

Toda reacción electroquímica puede dividirse en dos procesos en cierta medida independientes:

1. Un proceso anódico, mediante el cual los átomos metálicos de la red cristalina pasan a la solución en forma iónica hidratada liberando una cantidad equivalente de electrones que permanecen en el metal.
2. Un proceso catódico mediante el cual los electrones en exceso del metal se combinan con átomos, moléculas o iones que contienen la solución reduciéndolos.

En sentido estricto en el ánodo se realiza la oxidación del metal (pérdida de electrones) y en el cátodo la reducción de alguna sustancia presente en el electrólito (captura de electrones).

### **1.3.1.-Clasificación de la corrosión electroquímica**

Se puede hacer una clasificación de acuerdo a la manera en la que se produce la corrosión. Entre los tipos más comunes se pueden encontrar:

#### ***1.3.1.1.-Corrosión bimetalica***

También conocida como corrosión galvánica. Ocurre cuando están en contacto eléctrico dos metales distintos expuestos a soluciones corrosivas o a condiciones atmosféricas húmedas. Se caracteriza por la disolución acelerada del metal más reactivo. En este tipo de corrosión hay que tener en cuenta la relación de áreas (anódicas y catódicas) de los metales que forman el par galvánico.

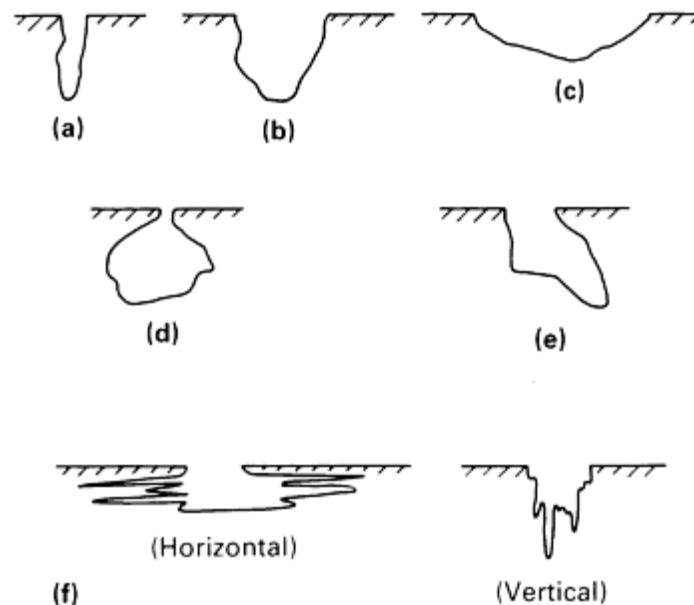
#### ***1.3.1.2.-Corrosión uniforme***

Este tipo de corrosión es la más comúnmente encontrada y se caracteriza por el adelgazamiento progresivo y uniforme del componente metálico.

Aceros y aleaciones de cobre a la intemperie son buenos ejemplos de materiales que normalmente presentan un ataque uniforme.

### 1.3.1.3.-Corrosión por picaduras

La picadura es una forma de corrosión localizada que suele ser un problema en aplicaciones donde participan metales con películas pasivas y aleaciones en ambientes agresivos. Este tipo de corrosión se da principalmente en aleaciones, como los aceros inoxidable y aleaciones de aluminio, los cuales son muy útiles debido a sus películas pasivas, éstas películas pasivas son muy delgadas (a escala nanométrica) son capas de óxido que se forman naturalmente en la superficie metálica, las cuales reducen enormemente la velocidad de corrosión en este tipo de aleaciones. Sin embargo, estas películas pasivas son susceptibles a la ruptura, localizada en la aceleración resultante de la disolución del metal. Este tipo de corrosión se presenta principalmente por la presencia de cloruros. En la figura (1.3.1) se presenta las diferentes morfologías de picadura.



**Figura. (1.3.1) Las variaciones en la forma en sección transversal de pozos. (a) estrechos y profundos. (b) Elíptica. (c) de ancho y poco profundo. (d) del subsuelo. (e) La socavación. (f) Las formas determinados por la orientación microestructural. Fuente de la imagen de ASM Handbook volumen 13<sup>a</sup>.**



#### *1.3.1.4.-Corrosión localizada*

Este tipo de corrosión se produce en las superficies metálicas recubiertas con una fina película orgánica que es típicamente 0.1 mm (4 milésimas de pulgada) de espesor. El patrón de ataque se caracteriza por la aparición de filamentos finos que emana de una o más fuentes en varias direcciones. La fuente de iniciación es generalmente un defecto en el revestimiento.

La corrosión localizada se confunde a menudo por tener orígenes biológicos debido a su aspecto vermiforme. La corrosión filiforme o localizada habitualmente se produce en las latas de acero recubiertas de aluminio, envases de aluminio laminado, aluminio pintado, lacado y otros objetos metálicos colocados en áreas sujetas a alta humedad.

#### *1.3.1.5.-Corrosión en rendijas*

Se presenta en uniones de piezas metálicas, en rendijas, debajo de arandelas, remaches, en juntas solapadas o debajo de depósitos (óxido o impurezas) u objetos localizados sobre la superficie metálica. Este tipo de corrosión al igual que corrosión por picaduras se presenta principalmente en aleaciones con capas pasivas tales como los aceros inoxidable, este tipo de corrosión es más favorable en aceros inoxidable con muy poco o nada de molibdeno. <sup>[Ref. 1]</sup>

#### *1.3.1.6.-Corrosión microbiológica*

Los organismos que se sabe que tienen un impacto importante en la corrosión son en su mayoría bacterias, algas y hongos (levaduras y mohos).

Los microorganismos varían en longitud desde 0.1 a más de 5 micras (algunas formas filamentosas pueden ser varios cientos de micras de longitud) y hasta aproximadamente 3 micras de ancho. Muchos de ellos son móviles, es decir, se puede "nadar" a una situación favorable, o fuera de un entorno desfavorable debido a su pequeño tamaño, pueden reproducirse en un corto tiempo. En condiciones favorables, algunas bacterias pueden duplicar su número cada 20

minutos o menos. Por lo tanto, una sola bacteria puede producir una masa de más de un millón microorganismos en menos de 7 h.

Además de reproducirse rápidamente, las bacterias como grupo pueden sobrevivir amplios intervalos de temperatura (-10° a 100° C) y un pH (0 a 10.5).

Este tipo de microorganismos crean una biopelícula la cual cambia químicamente la interfaz liquido-metal, a medida que esta biopelícula crece las bacterias crean subproductos en esta, las cuales pueden ser sulfuro de hidrógeno, ácidos orgánicos entre otros.

Todos los tipos de corrosión antes mencionadas, se pueden presentar en las armaduras de concreto, hay una variedad de corrosión electroquímica mayor a la mencionada, pero no será tomada en cuenta debido a que los mecanismos de iniciación son muy distintos a los que competen a esta tesis.

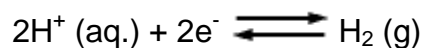
## 1.4.-Electrodos de referencia

El electrodo de referencia ideal tiene un potencial que se conoce con exactitud y es constante y totalmente insensible a la composición de la disolución del analito u o componente. Además, este electrodo debe ser resistente, fácil de montar y mantener un potencial constante al paso de pequeñas corrientes. Además de que los valores deben de ser estables a través del tiempo, y que corresponda a un electrodo reversible.

### 1.4.1.-Electrodo normal de hidrógeno

Este electrodo está constituido por una lámina de platino, sobre la cual se hace burbujear hidrógeno gas a la presión de una atmósfera, sumergida en una solución ácida (electrolito), cuya actividad de iones hidrógeno a 25°C es la unidad.

El electrodo de hidrógeno se basa en la semicelda redox:



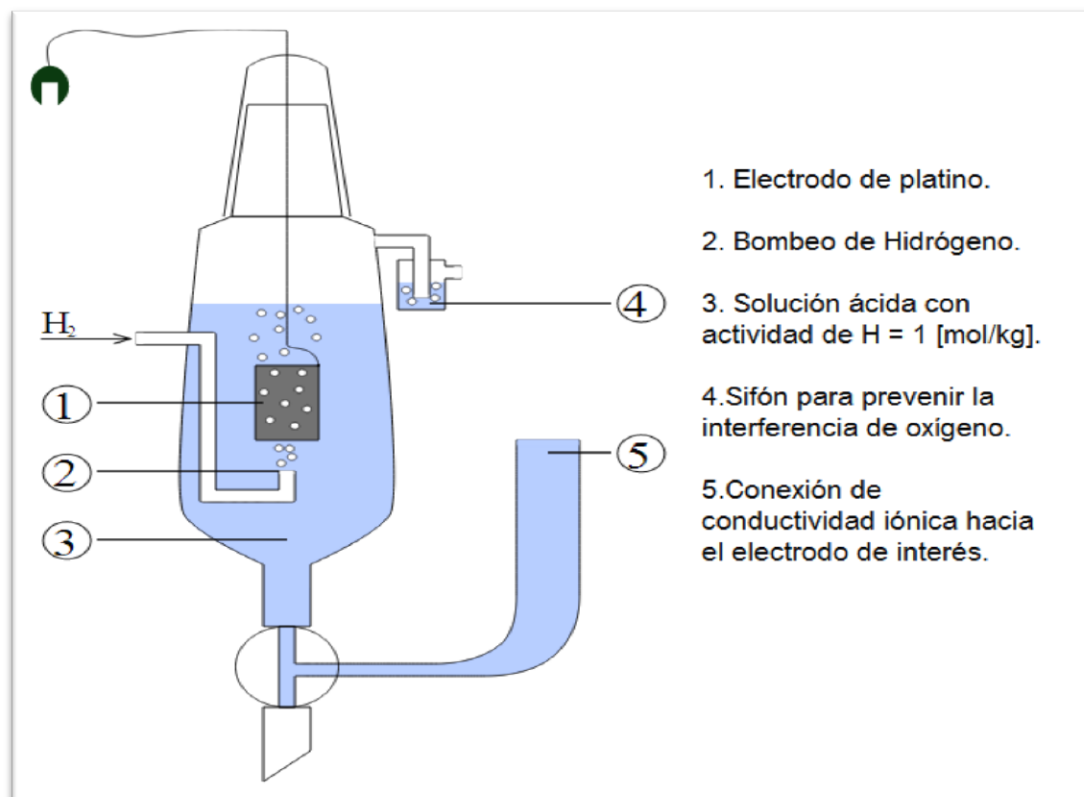
Esta reacción de oxidación-reducción ocurre en un electrodo de platino.

El uso de platino en éste electrodo se debe a varios factores entre los cuales están:

- ◆ Material inerte, que no se corroe.
- ◆ Capacidad para catalizar la reacción de reducción de protones.
- ◆ Alto intercambio intrínseco de densidad para la reducción de protones.

La dificultad principal de operación que se presenta en el manejo de un electrodo de hidrógeno, es que es demasiado frágil para la mayoría de las aplicaciones prácticas, lo cual ha dado lugar a la utilización de otros electrodos de referencia que lógicamente deben de reunir determinadas condiciones. Aparte de ser manejables y de construcción sencilla, la condición fundamental es que el potencial de equilibrio de la reacción de óxido-reducción (redox) que tenga lugar en ellos, permanezca constante respecto al electrodo de hidrógeno. En estas

condiciones, en cualquier momento se podría referir un potencial al del electrodo de hidrógeno o viceversa. En la Figura (1.4.1.1) se muestra un esquema del electrodo normal de hidrógeno.



**Figura (1.4.1.1): Electrodo Normal de Hidrógeno. Fuente de la imagen.**  
([http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard\\_hydrogen\\_electrode\\_2009-02-06.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_hydrogen_electrode_2009-02-06.svg))

### 1.4.2.-Electrodo de calomelanos

Este electrodo está formado por mercurio cubierto por una capa de cloruro insoluble (calomelanos  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ ) en equilibrio con una disolución de cloruro potásico KCl, que puede ser 0.1 M, 1 M o saturada (casi el 4.6M). El contacto eléctrico con el mercurio se realiza por medio de un hilo de platino. El electrodo está normalmente conectado por medio de una porcelana porosa a la disolución en la que está inmerso el otro electrodo. Este material poroso actúa como un puente salino. Un esquema de este electrodo se presenta en la figura (1.4.2.1).

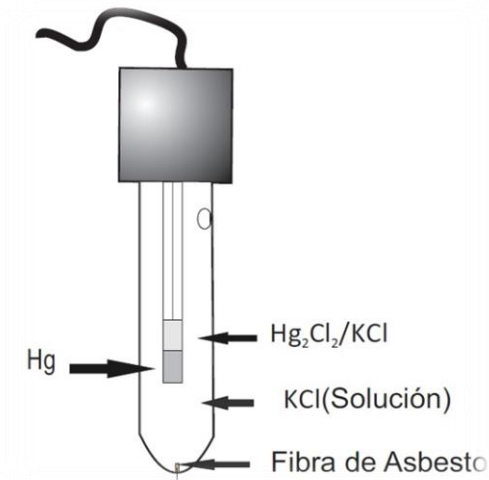


Figura (1.4.2.1): Electrodo de Calomelanos

Este electrodo de referencia puede representarse esquemáticamente de la siguiente manera:

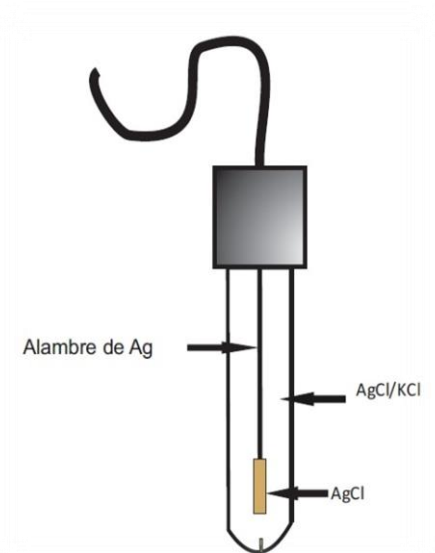


Donde x es la concentración molar del cloruro de potasio (KCl) en la disolución. El electrodo de calomelanos saturado (ECS) es el más empleado dada su fácil preparación.

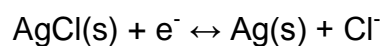
El adjetivo “Saturado” en el caso de un electrodo de calomelanos se refiere a la concentración de de KCl, no a la de calomelanos. Todos los electrodos de calomelanos están saturados con Hg<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>.

### 1.4.3.-Electrodo de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl)

Está formado por un hilo de plata [Ag] sobre el cual se deposita [AgCl], generalmente por vía electroquímica, en una solución de KCl, en la cual el hilo de [Ag] actúa como ánodo, como se muestra en la figura (1.4.3.1).



La Semirreacción es la siguiente:



Y su potencial de equilibrio a 25°C es:

$$E = 0.2224 - 0.059 \log [\text{Cl}^-].$$

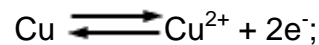
**Figura (1.4.3.1): Electrodo de Plata/Cloruro de plata.**

En agua de mar, el valor del potencial es aproximadamente de + 0.25 V respecto al electrodo normal de hidrógeno (ENH) a 25°C. El potencial del electrodo depende muy especialmente de la salinidad de la solución en la cual el electrodo está sumergido.

#### 1.4.4.-Electrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>)

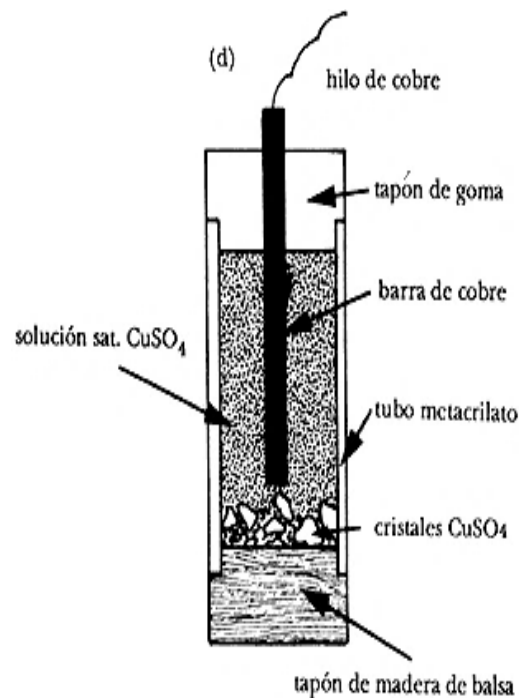
Está formado por una barra cilíndrica de Cu sumergida en una solución de CuSO<sub>4</sub> saturada. El contacto electrolítico con la solución o suelo se realiza mediante un puente salino constituido por un tapón de madera de balsa. En la figura (1.4.4.1) se ilustra éste tipo de electrodo.

La reacción del electrodo es la siguiente:



Su potencial de equilibrio a 25°C viene dado por:

$$E = 0.340 + 0.0295 \log [\text{Cu}^{2+}] \text{ V vs. ENH.}$$



**Figura (1.4.4.1): Electrodo de cobre/sulfato de cobre. Fuente de la Imagen: Más Allá de la herrumbre II. Figura 7d)**

Con la solución saturada de CuSO<sub>4</sub>, se tiene  $E = + 0.318 \text{ V vs. ENH}$ , pero para uso práctico se considera un valor de  $0.30 \text{ V}$ . Este tipo de electrodo puede

utilizarse en cualquier ambiente, sea en el suelo, agua de mar o aguas dulces. Entre otras ventajas, presenta la sencillez de su preparación y su gran estabilidad. Cuando se utiliza en agua de mar puede contaminarse con cloruros, por lo cual es más bien aconsejable en el suelo y en aguas dulces.

## **1.5.-Técnicas electroquímicas**

La medida de la corrosión utilizando métodos electroquímicos fue introducida en 1957 por Stern y Geary. La aplicación de estas técnicas se basa en la correlación entre transferencia de cargas eléctricas, el flujo de masa y la densidad de corriente.

Estas técnicas proporcionan información acerca de corrosión, pero no revelan el estado de deterioro del acero. Los resultados que se obtienen son únicamente válidos para las condiciones particulares en las que se han realizado las medidas.

La forma de proceder es imponer al sistema estudiado una señal eléctrica y analizar la respuesta producida. Por ejemplo, aplicación de señales de potencial y registro de su respuesta en corriente, o bien la aplicación de señales de corriente y el registro de la respuesta en potencial.

El estudio de los diferentes aspectos de la corrosión ha requerido el uso de varias técnicas electroquímicas las cuales se encuentran normadas según los estándares ASTM.

A continuación se describirá el fundamento teórico de las técnicas electroquímicas empleadas para determinar la velocidad de corrosión en el material estudiado.

### **1.5.1.-Técnica de Tafel**

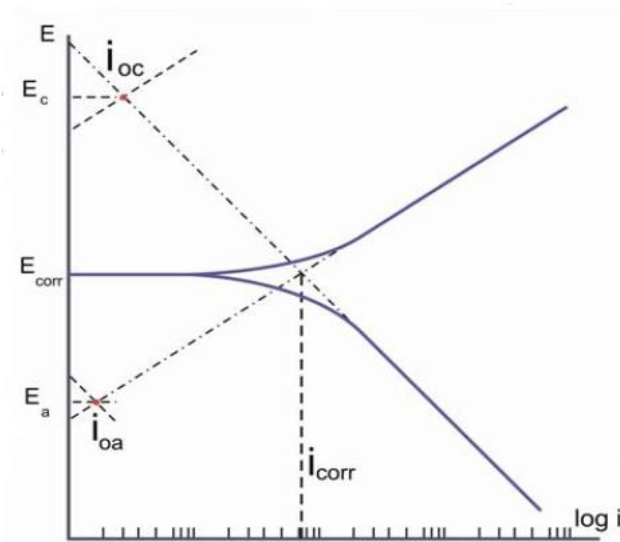
Cuando la señal o polarización aplicada es de corriente continua y se extiende a un campo más amplio de potenciales que en las medidas de  $R_p$ , se obtienen las llamadas curvas de polarización del sistema que podrían definirse como la relación entre el potencial o la corriente impuesta y la respuesta en la variable conjugada.

Dependiendo de la amplitud del barrido se pueden diferenciarse dos modalidades.



Técnica de Tafel, con imposiciones típicas de un sobrepotencial de 250 a 300 [mV] tanto en sentido catódico como anódico. Con esta técnica se obtiene la  $i_{\text{corr}}$ . Por la extrapolación de las regiones catódicas y anódicas en el potencial de corrosión. Las prolongaciones de los tramos rectos se cruzan definiendo la  $I_{\text{corr}}$  de ese material y en ese medio. Además, es posible calcular las pendientes de Tafel, que son parámetros cinéticos útiles en el cálculo de la  $i_{\text{corr}}$  con  $R_p$ .

La segunda técnica se basa en curvas de polarización con imposición de amplias polarizaciones que dan idea del comportamiento de un material en un determinado medio. Representando las curvas de polarización de coordenadas semilogarítmicas y extrapolando su rama recta hasta  $E_{\text{corr}}$  se puede determinar  $I_{\text{corr}}$  por el llamado método de intersección el cual se muestra en la figura (1.5.1).



**Figura (1.5.1): Esquema del método de intersección para estimar la  $I_{\text{corr}}$**   
Fuente de la Imagen: [www2.scielo.org.ve](http://www2.scielo.org.ve)

La principal desventaja de este método reside en la necesidad del trazado completo de las curvas de polarización, lo cual posibilita un análisis electroquímico de la cinética del proceso de corrosión y por otra parte puede dar lugar a modificaciones de la superficie del electrodo por efecto de las elevadas polarizaciones aplicadas.

El cálculo de la velocidad de corrosión por el método de extrapolación de Tafel, conocido también como método de intersección, se lleva a cabo mediante la extrapolación de la zona lineal de la curva de polarización ( $\log i$  vs  $E$ ), anódico y/o catódico al valor del potencial de corrosión.

### 1.5.2.- Resistencia a la polarización o polarización lineal

La resistencia de polarización es una técnica que fue descrita a finales de la década de los 50 (*Stern y Geary, 1957*). La resistencia a la polarización ( $R_p$ ) o polarización lineal es una técnica electroquímica para medir la resistencia que opone el material a ser polarizado. La técnica consiste en desplazar al sistema de su potencial de equilibrio, a otro ya sea catódico o anódico, registrándose las variaciones de potencial ( $\Delta E$ ) y de corriente ( $\Delta I$ ) en el sistema debido a este desplazamiento.

La ecuación para el cálculo de la velocidad de corrosión  $i_{corr}$  al aplicar la  $R_p$  se obtiene a través de la ley de Ohm:

$$E = I \cdot R$$

Despejando la resistencia ( $R$ ) tenemos:

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

Donde  $E$  es el potencial,  $I$  la corriente y  $R$  la resistencia.

La resistencia a la polarización  $R_p$  se puede definir en función del desplazamiento del potencial:

$$R_p = \frac{E}{I} = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

Durante muchos años de investigación científicos observaron experimentalmente el grado de polarización es una determinada corriente aplicada fue mayor a una velocidad de corrosión. Además, se observó una aparente linealidad en el origen de la curva de polarización por lo tanto, la pendiente de la curva lineal es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión.

A través de esta polarización y de las pendientes de Tafel, la velocidad de corrosión se expresa de acuerdo con la ecuación de Stern-Geary:

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p}$$
$$B = \frac{(b_a b_c)}{2.303(b_a + b_c)}$$

Donde:

B es la constante de Tafel,  $b_a$  y  $b_c$  son las pendientes de Tafel anódica y catódica respectivamente.

El valor de B puede variar entre 13 y 52 mV en la mayoría de los sistemas metal-medio. En el concreto armado se asumen valores de 26 mV para el acero activo y de 52 mV para el acero pasivo. [Ref. 4]

De manera que se debe realizar entonces de manera obligatoria primero la extrapolación de Tafel para determinar las pendientes y a continuación determinar la  $R_p$  y calcular la velocidad de corrosión

El procedimiento se basa en que las curvas de polarización son prácticamente rectas en un pequeño entorno del potencial de corrosión y su pendiente está relacionada con la velocidad de corrosión. En la práctica se aplica una pequeña polarización,  $\Delta E$ , de  $\pm 30$  mV de acuerdo con la norma ASTM G59-97 y se mide la densidad de corriente resultante,  $\Delta I$ , dando nombre al método el hecho de que las dimensiones del cociente  $\Delta E/\Delta I$  sean las de una resistencia.

La  $R_p$  tiene unidades de ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ).

La interpretación de las medidas de velocidad de corrosión con relación al nivel de corrosión han sido determinadas a partir de una experiencia previa en laboratorio (Andrade C., 1977), (Andrade, 1978), (Andrade, 1990) [Ref. 21] que luego fue comprobada para la utilización de la técnica in situ (J. Rodríguez, 1993) es la siguiente. [Ref. 21]

Densidad de corriente ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Nivel de corrosión
< 0.1	Despreciable
0.1 a 0.5	Baja
0.5 a 1	Moderada
>1	Alta

**Tabla 1.5.2.1.- Medidas de Potencial – Riesgo potencial** <sup>[Ref.21]</sup>

A continuación se mencionan las ventajas y limitaciones de esta técnica.

#### Ventajas de la Rp

- ❖ Se trata de una técnica no destructiva pues emplea bajas perturbaciones.
- ❖ Proporciona velocidad de corrosión instantánea.
- ❖ No hace falta instrumentación muy sofisticada pues solamente se necesita un Potenciostato y en consecuencia, es una técnica económica.

#### Limitaciones de la Rp

- ❖ Es necesario que el potencial sea estable.
- ❖ Caída óhmica en sistema altamente resistivos, lo que la hace poco recomendable.
- ❖ Es necesaria una velocidad de barrido adecuada.

## **1.6.-Corrosión de las armaduras de concreto en ambiente marino**

La mayoría de las aguas de mar presentan una composición química uniforme, caracterizada por la presencia de un 3.5% de sales solubles en peso. Las mayores concentraciones son las del  $\text{Na}^+$  y del  $\text{Cl}^-$ , que son de 11 y 20 [mg/l] respectivamente. También hay cantidades significativas de  $\text{Mg}_2+$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , normalmente 1.4 y 2.7 [mg/l], respectivamente. El pH varía entre 7.5 y 8.4.

El concreto expuesto a un ambiente marino, puede deteriorarse debido a los efectos combinados de la acción química, de los constituyentes del agua de mar, sobre los productos de hidratación del cemento, de la reacción álcali-árido (cuando hay áridos reactivos), de la presión de cristalización de sales en el concreto, si una cara de la estructura está sometida a condiciones de humedad y la otra a condiciones de secado, a la acción del hielo en climas fríos, a la corrosión de las armaduras y la erosión física debido a la acción de las olas y de las partículas en suspensión. Cada una de estas acciones provoca un aumento de la permeabilidad del concreto, lo que contribuye a que progrese el ataque de la causa inicial y el de los demás tipos de acción.

Del estudio de diferentes casos reales de deterioro de estructuras de concreto en ambiente marino se concluyó que:

- La permeabilidad es la llave de la durabilidad. El origen de este exceso de permeabilidad puede estar en mezclas de concreto mal dosificadas, ausencia de aire ocluido si la estructura se encuentra en climas fríos, compactación y curado inadecuados, falta de recubrimiento de las armaduras, juntas mal diseñadas o construidas, microfisuración del concreto debido a las cargas, a la retracción térmica o seca, y la expansión por la reacción álcali-árido.
- El tipo y la severidad del daño pueden no ser uniformes a lo largo de la estructura.
- La corrosión de las armaduras suele ser la principal causa de deterioro del concreto armado o pretensado expuesto al agua de mar.

- El daño real del concreto debido al crecimiento de organismos marinos no es un problema habitual. No obstante, se ha constatado que las algas pueden aumentar la velocidad de degradación del concreto, debido posiblemente a la acción de los ácidos orgánicos y sulfatos producidos en la descomposición de la vegetación. También se ha observado que en los trópicos algunos tipos de moluscos pueden erosionar al concreto a una velocidad de 1 cm por año. Las algas en las zonas sumergidas pueden mejorar la durabilidad sellando la superficie del concreto.

### **1.6.1.- Componentes y estructura del concreto armado**

El concreto es un material de construcción que se obtiene de la mezcla de agua, cemento, arena y grava. De la distinta mezcla de estas materias primas se obtienen también otros materiales de construcción a fines:

**Pasta de cemento:** Proveniente de la mezcla de agua y cemento.

**Mortero:** Proveniente de la mezcla de agua, cemento y arena.

**Concreto:** Proveniente de la mezcla de agua, cemento, arena y grava.

A estos materiales, en el momento de su amasado, se les puede añadir otros productos para mejorar algunas características como puede ser resistencia, compacidad, durabilidad y rapidez de fraguado.

Si la dosificación y mezcla de los componentes no es adecuada, no rellenarán completamente el sistema de poros, quedando un concreto permeable proporcionando un camino de ingreso de los agentes agresivos hacia el interior. Así, se desencadenarán los procesos de corrosión de las armaduras pudiendo provocar el fallo de la estructura antes de lo previsto.

El concreto es uno de los materiales más utilizados en todo el mundo, debido a que presenta ciertas ventajas como material para la construcción las cuales son:

- ◆ Permite conseguir piezas de cualquier geometría, debido al carácter plástico que posee en estado fresco.

- ◆ Posee elevada resistencia mecánica a la compresión y, aunque posea menor resistencia a la tracción, permite aumentarla embebiendo acero de refuerzo en su interior.

Pero no todo son ventajas en el concreto, pues a este material presenta también ciertos inconvenientes como son:

- ◆ La anisotropía (en su resistencia mecánica)
- ◆ Baja relación resistencia y peso.
- ◆ Es sensible a determinados agentes agresivos, tanto de tipo físico como químico.
- ◆ No es reciclable.

### **1.6.1.1- Materias primas: acero al carbono**

El acero al carbono, constituye el principal producto de los aceros que se producen, estimando que un 90% de la producción mundialmente corresponde a aceros al carbono y el 10% restante son aceros aleados.

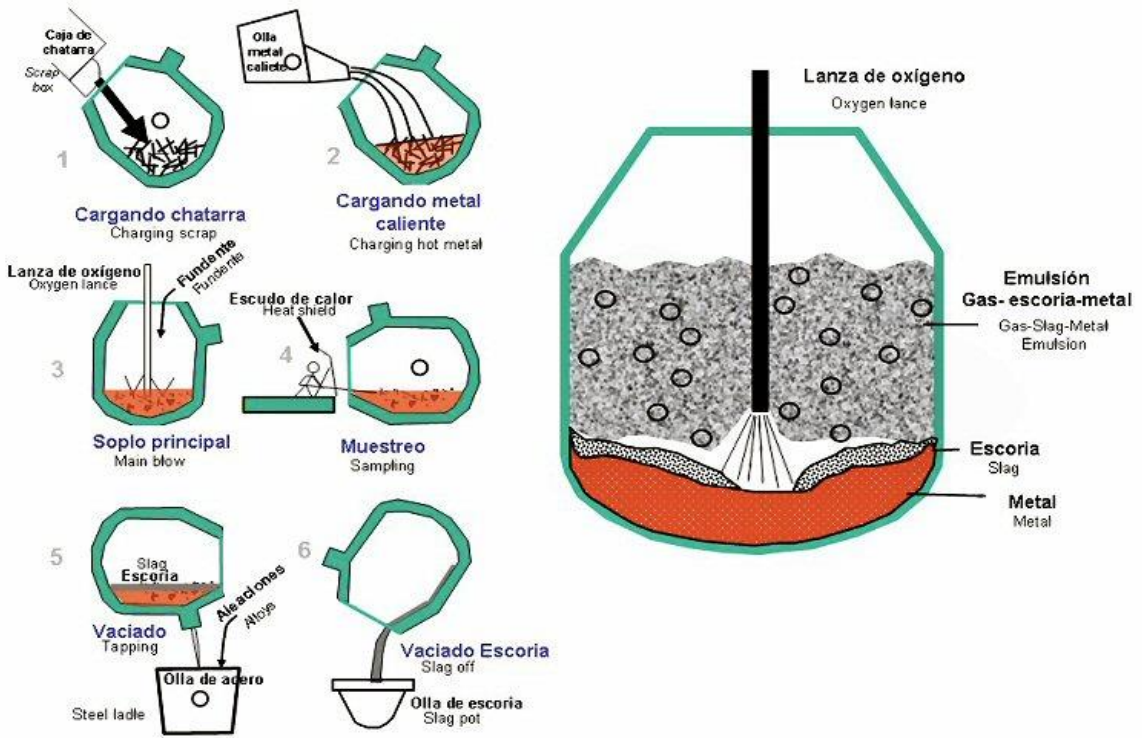
El acero es muy resistente y dúctil; sin embargo, conforme el contenido de carbono aumenta, el acero se hace más resistente y duro, pero menos dúctil y resistente al impacto. Los aceros que contienen entre 0.5% y 1.5% de carbono son capaces de ser endurecidos y templados por un tratamiento térmico, los aceros al carbono se dividen en aceros suaves o de bajo carbono y aceros de alto carbono que en algunas ocasiones son conocidos como aceros para herramientas.

La mayoría de los aceros empleados para la construcción son de bajo o medio carbono, contiene de 0.15 a 0.5% de carbono y se produce por el proceso de horno de arco eléctrico y en convertidores de sople de oxígeno en la figura (1.6.1.1), se observa una imagen de un taller de fundición por arco eléctrico y en la figura (1.6.1.2) se observa el proceso de horno de oxígeno básico o BOF.



**Figura (1.6.1.1):** Proceso de fabricación de varillas.  
[http://www.grupoacero.com.mx/admin/assetmanager/images/imagen\\_inicio.jpg](http://www.grupoacero.com.mx/admin/assetmanager/images/imagen_inicio.jpg)

**Flujo de Proceso del BOF**



**Figura (1.6.1.2):** Proceso de fabricación de varillas.  
<http://pelandintecno.blogspot.mx/2010/09/obtencion-de-acero-y-fundiciones.html>



El acero normalmente empleado en el concreto reforzado tiene forma de barras de pequeños diámetro y gran longitud, de sección sensiblemente circular, las barras son corrugadas, llevando unas protuberancias o resaltes que facilitan su adherencia al concreto, estas protuberancias son debidas al proceso de laminación.

El índice de resistencia más comúnmente utilizado para identificar un acero es el esfuerzo de fluencia. El empleo de este índice, así como de las demás características de los diagramas esfuerzo-deformación en la predicción del comportamiento de elementos estructurales tiene limitaciones, puesto que las condiciones reales de uso de la estructura pueden no corresponder a las condiciones en que se efectúan los ensayos estándar.

### **1.6.2.-La corrosión del acero en el concreto**

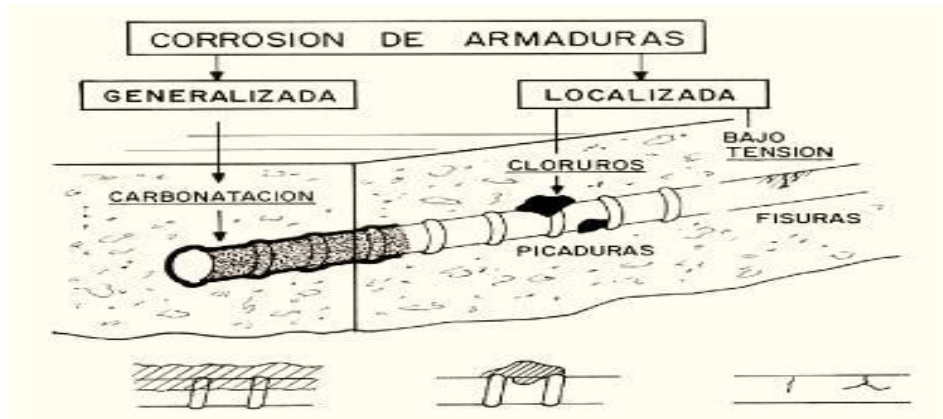
Durante la hidratación del cemento se obtiene una disolución en los poros altamente alcalina (pH entre 13 y 13.8), principalmente de hidróxidos de sodio y potasio. En este ambiente los compuestos termodinámicamente estables del hierro son óxidos y oxihidróxidos de hierro. Por tanto, para un acero de refuerzo ordinario embebido en el hormigón alcalino se forma espontáneamente una fina capa protectora de óxido (la capa pasivante) <sup>[Ref. 4]</sup>. Esta capa pasivante sólo tiene unos nanómetros de espesor y está compuesta de óxido de hierro más o menos hidratados con un grado variable de  $Fe^{2+}$  y  $Fe^{3+}$ . La acción protectora de la capa pasivante es inmune al daño mecánico de la superficie del acero.

La corrosión del acero en el hormigón es un proceso electroquímico. Los potenciales electroquímicos que forman las pilas de corrosión se pueden de dos formas:

- ❖ Las pilas de composición se pueden formar cuando se colocan dos metales diferentes dentro del hormigón, como las armaduras de acero y los conductos de aluminio, o cuando existe variaciones significativas en las características superficiales del acero.

- ❖ Las pilas de concentración se pueden formar debido a diferencias en la concentración de los iones disueltos cerca del acero, como los álcalis, cloruros o el oxígeno.

Como consecuencia, uno de los dos metales (o algunas partes del metal si sólo hay uno) se convierte en ánodo y el otro en cátodo. Figura (1.6.2.1).



**Figura (1.6.2.1): Tipos de Corrosión de armaduras y factores que lo provocan**  
 Fuente "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado" Pág. 29  
 Miguel Ángel Climent Llorca, Pedro Garcés Terradillos, Emilio Zornoza Gómez

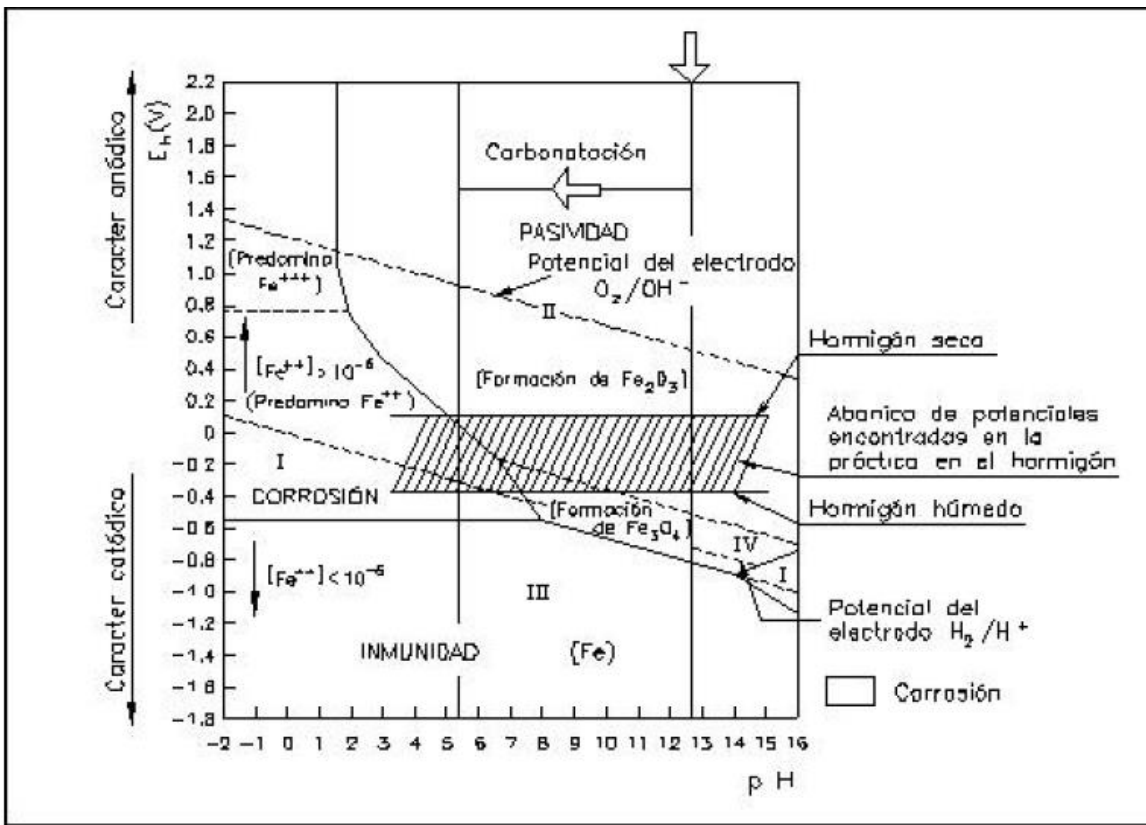
### 1.6.3.-Pasivación del acero en el concreto: el diagrama de Pourbaix

El diagrama de Pourbaix es un diagrama de equilibrio Potencial/pH, en el que el eje de abscisas representa los valores de pH de la solución y el eje de las ordenadas los valores del potencial del electrodo. Los dominios de estabilidad de las diferentes sustancias consideradas están limitados por líneas que representan condiciones de equilibrio para los siguientes tipos de reacción. Figura (1.6.3.1).

- ◆ Las líneas verticales representan reacciones químicas en las que intervienen iones  $H^+$  u  $OH^-$ .
- ◆ Las líneas inclinadas representan reacciones electroquímicas en las que intervienen iones  $H^+$  u  $OH^-$ .

- ◆ Las líneas horizontales suponen reacciones electroquímicas en las que no intervienen iones  $H^+$  ni  $OH^-$ .

Por lo tanto, los diagramas de Pourbaix establecen para cada metal las condiciones de pH y de potencial en las que el metal se corroe, se pasiva o permanece inmune. El estado definido como de “pasividad” supone que el metal se cubre de una capa de óxidos, transparente, imperceptible y que actúa de barrera impidiendo la posterior oxidación. El metal posee la apariencia de mantenerse inalterado. En cambio, el estado de inmunidad supone que el metal no se corroe al no darse las condiciones termodinámicas para ello. Es el estado en el que se sitúan los metales sometidos a protección catódica.

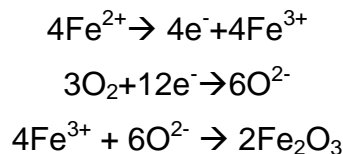


**Figura (1.6.3.1).- Diagrama Pourbaix hierro-agua y condiciones reales del acero embebido en hormigón. Tesis Doctoral “Corrosión de las armaduras del hormigón en ambiente marino”.**

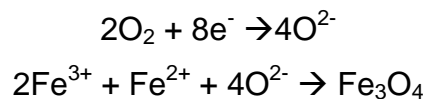
Para el caso del acero, la zonificación del diagrama de Pourbaix se describe a continuación:

- ❖ Zona I, de corrosión generalizada
- ❖ Zona II, Pasividad del acero. La protección de que ésta goza puede ser eliminada por la existencia de cloruros, que, al destruir la capa de pasivación originan la corrosión localizada por picadura.
- ❖ Zona III, de inmunidad (Fe que no pasa a estado iónico)
- ❖ Zona IV, de pasividad, por formación de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

En condiciones normales, el acero embebido en el concreto se encuentra amparado por una doble protección: física (El espesor del recubrimiento de concreto) y química (el pH alcalino del concreto, con valores habituales de 12-13, que sitúa al acero en la zona de pasividad del diagrama de Pourbaix, en la que se forman en la superficie del acero una capa protectora de óxido  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  de espesor muy pequeño, del orden de 100 Å, que impide toda corrosión ulterior)<sup>[Ref. 3]</sup>. Las reacciones de formación de esta capa protectora de óxido son:



Sin embargo, la capa pasiva está formada no sólo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sino que es una mezcla de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  entremezclado con hidratos del cemento, aunque el  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  no es un óxido pasivo, ya que su porosidad es muy elevada comparada con la del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . La formación del  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  es como sigue.<sup>[Ref.3]</sup>



## 1.7 Pérdida de alcalinidad. Carbonatación

El acero en estructuras de concreto es protegido del ambiente atmosférico debido a la alcalinidad de la solución del poro ( $\text{pH} > 12$ ). Sin embargo, el acero puede corroerse si la protección se pierde. La protección puede perderse debido al ingreso de iones agresivos de cloruros esto en el caso de ambientes marinos o la neutralización de la solución del poro, proceso mejor conocido como carbonatación. La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el  $\text{CO}_2$  atmosférico. Como consecuencia de esta reacción se reduce el pH de la solución del poro del concreto  $\text{pH} \approx 8$  <sup>[Ref.3]</sup>.

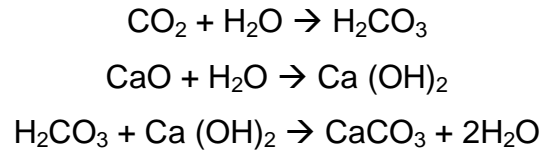
Actualmente se conoce que la carbonatación depende de varios factores como son el tipo y cantidad de cemento, porosidad del material, tipo y cantidad de adiciones de puzolanas.

En condiciones, el acero inmerso en concreto se encuentra en el punto "P" del diagrama de Pourbaix. Sin embargo, la estructura porosa del concreto permite la penetración a su interior del dióxido de carbono del aire. Cuando esto sucede se produce la reacción del  $\text{CO}_2$  con la fase líquida intersticial saturada de hidróxido cálcico del concreto y de los compuestos hidratados del cemento en equilibrio con dicha fase líquida.

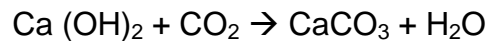
Después de la hidratación, los hidróxidos de sodio y de potasio están completamente disueltos en la solución de los poros por lo que reaccionan rápidamente con el  $\text{CO}_2$  disuelto en los mismos. Después de la neutralización de los iones en forma de carbonatos, el hidróxido cálcico se disuelve para restaurar el equilibrio químico y se forma carbonato cálcico que cristaliza en calcita estable y aragonito metaestable. Ambas, la disolución como la concentración de hidróxido cálcico en la pasta de cemento es mucho mayor que la de los hidróxidos sódico o potásico, la primera es el factor dominante para mantener la alcalinidad del líquido.

La formación de carbonato cálcico desde hidróxido cálcico supone un incremento en volumen del 11%.

El proceso de carbonatación se puede describir según el siguiente proceso:



La reacción se puede escribir de forma simplificada:



Como consecuencia, cuando todo el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$  y  $\text{KOH}$  presentes en los poros han sido carbonatados, se reduce la concentración de iones hidróxido de la solución de los poros y por lo tanto, el pH decrece.

En presencia de agua y exceso de  $\text{CO}_2$ , se forma bicarbonato cálcico. La carbonatación se produce para concentraciones de  $\text{CO}_2$  muy bajas, del orden de 0.03% en volumen. La velocidad de avance del frente carbonatado crece en zonas más contaminadas como pueden ser zonas urbanas. El desarrollo de la carbonatación depende en gran medida de diversos factores, entre los que se puede enumerar los siguientes: contenido de  $\text{CO}_2$  en la atmosfera, permeabilidad del concreto, cantidad de sustancia carbonatable (contenido de cemento y tipo de cemento) y humedad relativa del ambiente.

La cinética de la reacción de carbonatación puede considerarse que sigue un modelo parabólico donde la profundidad del frente es función de la raíz cuadrada del tiempo:

$$X = K_c \sqrt{t}$$

Donde  $X$  es el espesor de la capa carbonatada,  $t$  es el tiempo de exposición y  $K_c$  es una constante que depende de la permeabilidad del recubrimiento. El valor de la constante de carbonatación  $K_c$  se puede obtener experimentalmente para un

determinado caso, si se conoce el tiempo de exposición en años, midiendo la profundidad del frente carbonatado.

El aumento de la relación agua-cemento favorece el proceso de carbonatación, al proporcionar hormigones más permeables. Como estimación, un hormigón con relación agua-cemento 0.7 presenta una profundidad de carbonatación del orden del doble que uno con una relación 0.5.

Otra manera de favorecer la alcalinidad, es tener una humedad relativa entre el 60 y 75% además de que humedades relativas del 80% dificultan la difusión del  $\text{CO}_2$ .

## **1.8 Corrosión inducida por cloruros**

Los iones cloruros llegan al concreto o bien porque se añaden con sus componentes (aditivos, agua...) durante el amasado, o porque penetran desde el exterior a través de la red de poros. Esta situación es la que se da en ambientes marinos o cuando se utilizan sales para el deshielo de carreteras o puentes, en climas fríos.

Estos iones se disuelven en el agua que contienen los poros y avanzan hacia el interior por difusión u otros mecanismos de transporte. Sin embargo, los iones cloruros disueltos en los poros pueden interaccionar con las fases sólidas del concreto quedando inmovilizados, por tanto, el cloruro dentro del concreto puede encontrarse en varios estados.

- Cloruro libre: es el que permanece disuelto en el agua que contiene los poros. Se desplaza por el interior del concreto mediante difusión u otros mecanismos.
- Cloruro ligado: es el que permanece unido a las fases sólidas del concreto. Este cloruro queda inmovilizado, sin posibilidad de moverse hacia el interior del concreto.
- Cloruro total: es la suma total de los cloruros libres y ligados.

La acción de los iones cloruro forman complejos solubles con los iones hierro, lo que favorece la disolución del óxido de hierro.

## 1.9.- Aceros galvanizados

El acero galvanizado al ser expuesto presenta un mejor comportamiento frente a la corrosión, confirmando así, que el depósito superficial de zinc incrementa la vida útil del acero. El acero galvanizado presenta una buena resistencia a la corrosión, debido a que tiene la propiedad de formar una película compacta y de buena adherencia sobre el hierro. Por otra parte, al ser el zinc un metal más activo que el hierro, da lugar a la formación de un par galvánico con el acero, disminuyendo así la velocidad de deterioro del acero. Sin embargo, el nivel de protección del acero galvanizado depende de varios factores, tales como, espesor y porosidad de la capa de zinc, adherencia al hierro, naturaleza de los productos de corrosión formados, así como también del tiempo de exposición al medio y el contenido de contaminantes en la atmósfera.

### 1.9.1.- Acero galvanizado por inmersión en caliente

Pueden obtenerse recubrimientos de zinc metálico sobre superficies preparadas de hierro o acero mediante metalización, cincado electroquímico, recubrimientos con pinturas ricas en zinc y por galvanización en caliente. Este último procedimiento es el más eficaz, económico y el que se utiliza más ampliamente para la protección contra la corrosión.

Las propiedades más importantes del acero galvanizado son: conformabilidad, pintabilidad, soldabilidad, resistencia a la corrosión, acabado superficial y características de fricción.

Para el galvanizado por inmersión en caliente, existen dos métodos los cuales son los siguientes:

- ✓ **Por lotes:** este método se utiliza principalmente para estructuras y piezas con geometrías irregulares y de gran tamaño.
- ✓ **Por proceso continuo:** este proceso sirve para piezas laminadas, alambres y tubos.

Aunque los procesos pueden variar de una planta a otra, los pasos fundamentales en el proceso de galvanizado son:



## Preparación de la superficie

La preparación de la superficie es el proceso más importante para la aplicación de cualquier revestimiento. La preparación de la superficie del acero a galvanizar consta de tres etapas, las cuales son:

- » Desengrasado/Limpieza cáustica: Una solución alcalina caliente que elimina la suciedad, el aceite, la grasa y otras impurezas en el acero.
- » Decapado: en esta parte se utilizan ácidos, ya sea clorhídrico o sulfúrico diluido para eliminar óxidos de hierro y cascarilla de laminación, para tener una superficie metálica limpia químicamente.
- » Flujo: en el procedimiento de galvanizado conocido como “vía húmeda”, los objetos, una vez preparados superficialmente, se introducen en el crisol de galvanización, que contiene zinc fundido, a través de una cubierta de flujo que flota sobre el metal fundido. El flujo disuelve o absorbe cualquier impureza, restos de óxidos o humedad que hayan podido quedar sobre la superficie del acero, asegurando de esta manera que la superficie este completamente limpia cuando entra en contacto con el baño de zinc. En el procedimiento de “vía seca” los artículos se tratan previamente con una solución de flujo y, después de secarlos, se galvanizan en un baño de zinc sin cubierta de flujo. En esta parte el flujo es cloruro de zinc y cloruro de amonio.

En la figura (1.9.1.1) una imagen de la preparación de la superficie.



**Figura (1.9.1.1) Preparación de la superficie del acero a galvanizar.**  
**Fuente Galvaqro S.A. de C. V.**

## **Galvanizado**

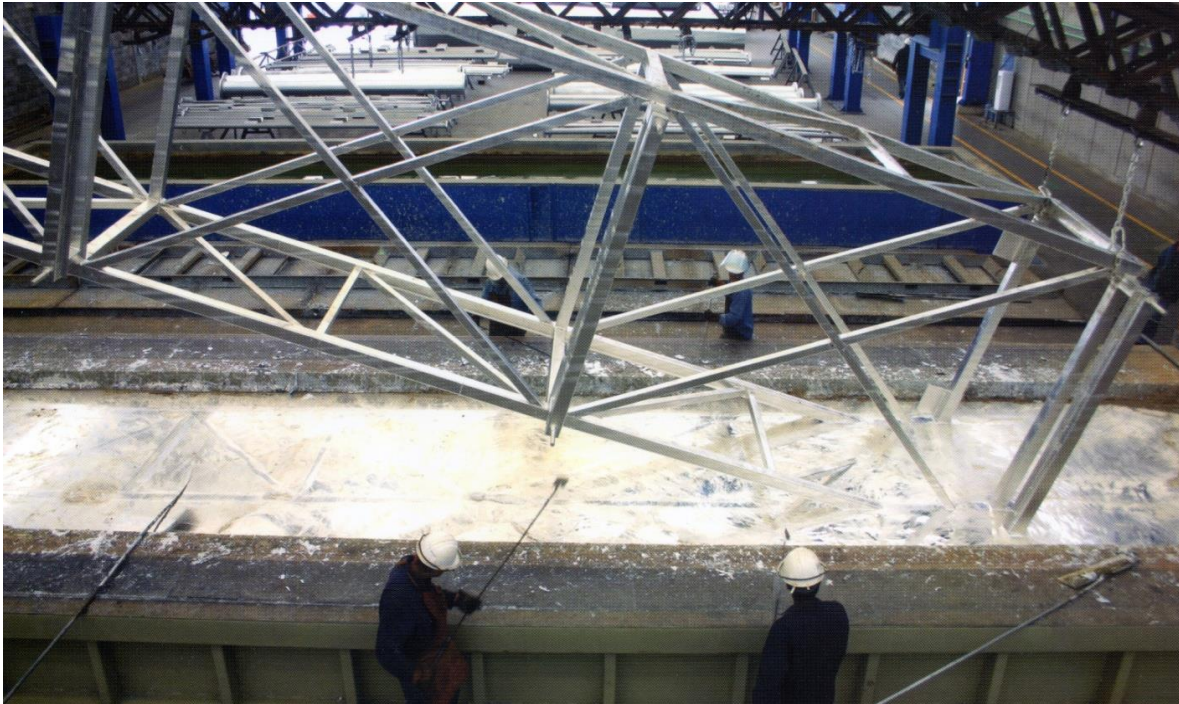
Durante la inmersión en el baño de zinc fundido, la superficie de los objetos de hierro o acero reacciona con el zinc y forma distintas aleaciones de zinc-hierro. Para facilitar esta reacción, los objetos se mantienen sumergidos hasta que su temperatura alcanza la del zinc fundido, entre 445° y 465° C. El tiempo de inmersión oscila desde unos pocos segundos para los objetos de chapa fina y varios minutos para las piezas estructurales de gran tamaño y espesor.

La química del baño es de al menos 98% de zinc puro de acuerdo con la norma ASTM B6. Algunas galvanizadoras llegan a utilizar zinc fundido a una temperatura de 540 y 570 °C para aceros reactivos.

Los objetos se extraen del baño a una velocidad controlada y arrastran consigo una película de zinc fundido que, al solidificarse, constituye la capa externa de zinc prácticamente puro. El resultado es un recubrimiento tenaz, formado por una capa externa de zinc y varias capas de aleaciones zinc-hierro que están unidos metalúrgicamente al acero base.

El artículo o pieza galvanizada es enfriada ya sea por una solución pasiva o por quedar al aire libre.

La figura (1.9.1.2) se muestra como se realiza el galvanizado de una estructura.



**Figura (1.9.1.2) Proceso de galvanizado por inmersión en caliente.**  
**Fuente Galvaqro S.A. de C. V.**

## **Inspección**

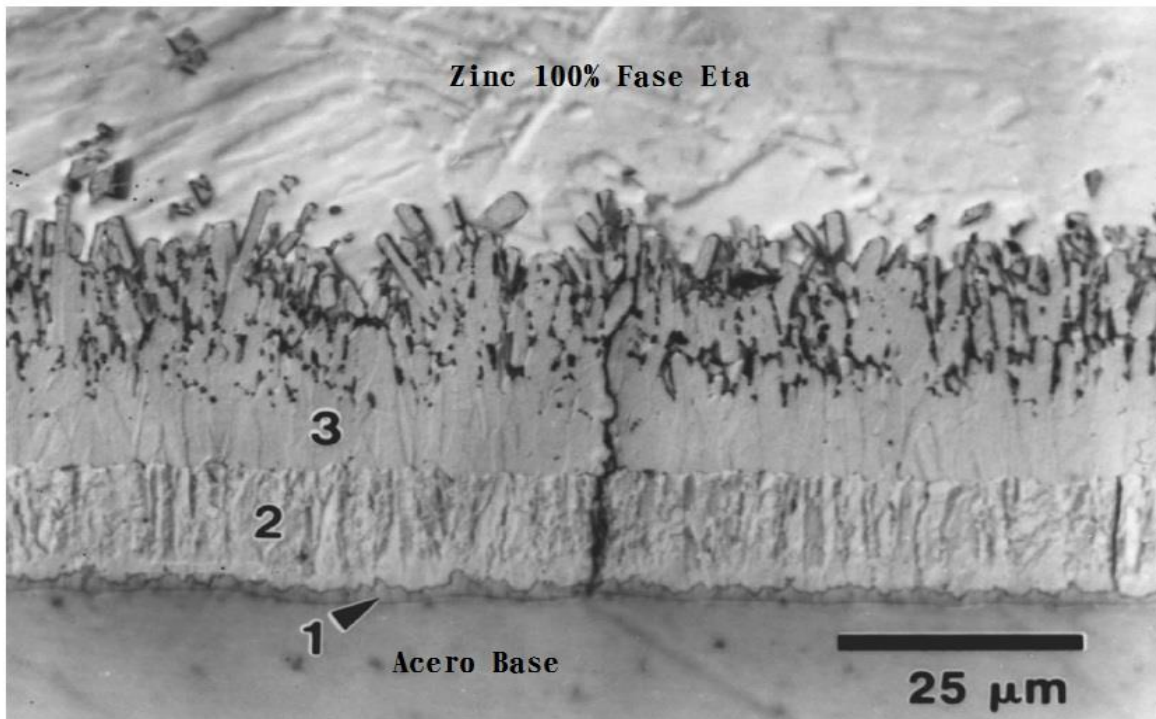
La inspección del acero galvanizado en caliente es rápida y sencilla. Las dos propiedades más minuciosamente analizadas son el grosor del revestimiento y la apariencia / estado de la superficie <sup>[Ref14]</sup>. Una variedad de simples pruebas físicas se pueden realizar para asegurar la conformidad con las especificaciones establecidas desde hace tiempo por la ASTM de los cuales pueden ser magnéticos o gravimétricos, estas técnicas también son aplicables para las normas mexicanas.



### 1.9.1.1 Microestructura

El proceso de galvanización en caliente es un proceso metalúrgico de difusión. La difusión se produce cuando el acero y el zinc dentro del baño fundido, interaccionan dando lugar a la formación de varias capas de hierro-zinc.

En la siguiente figura (1.9) se muestra la microestructura del acero galvanizado el cual consta principalmente de 3 aleaciones hierro-zinc y una capa metálica 100% zinc.



**Figura (1.9): Microestructura del acero galvanizado, en el cual se puede apreciar lo siguiente: 1.Gamma ( $\Gamma$ ) con (75% Zn, 25% Fe) 250 dureza DPN. 2 Delta ( $\delta$ ) con (90% Zn, 10% Fe) 244 dureza DPN. 3 Zeta ( $\zeta$ ) con (94% Zn, 6% Fe) 179 dureza DPN. Fuente The metallurgy of zinc-coated steel A.R. Marder**

Las capas Gamma, Delta y Zeta son más duras que el acero base lo cual cubre al revestimiento de daños mecánicos. La fase Eta tiene 70 de dureza DPN (número de dureza con penetrador piramidal de diamante) la cual la hace dúctil.

La unión metalúrgica asegura una alta adherencia del recubrimiento, del orden 3600 psi (24.82 MPa). La combinación de dureza ductilidad y adherencia protegen al acero galvanizado contra posibles daños durante el transporte, trabajos en sitio y futura vida en servicio.

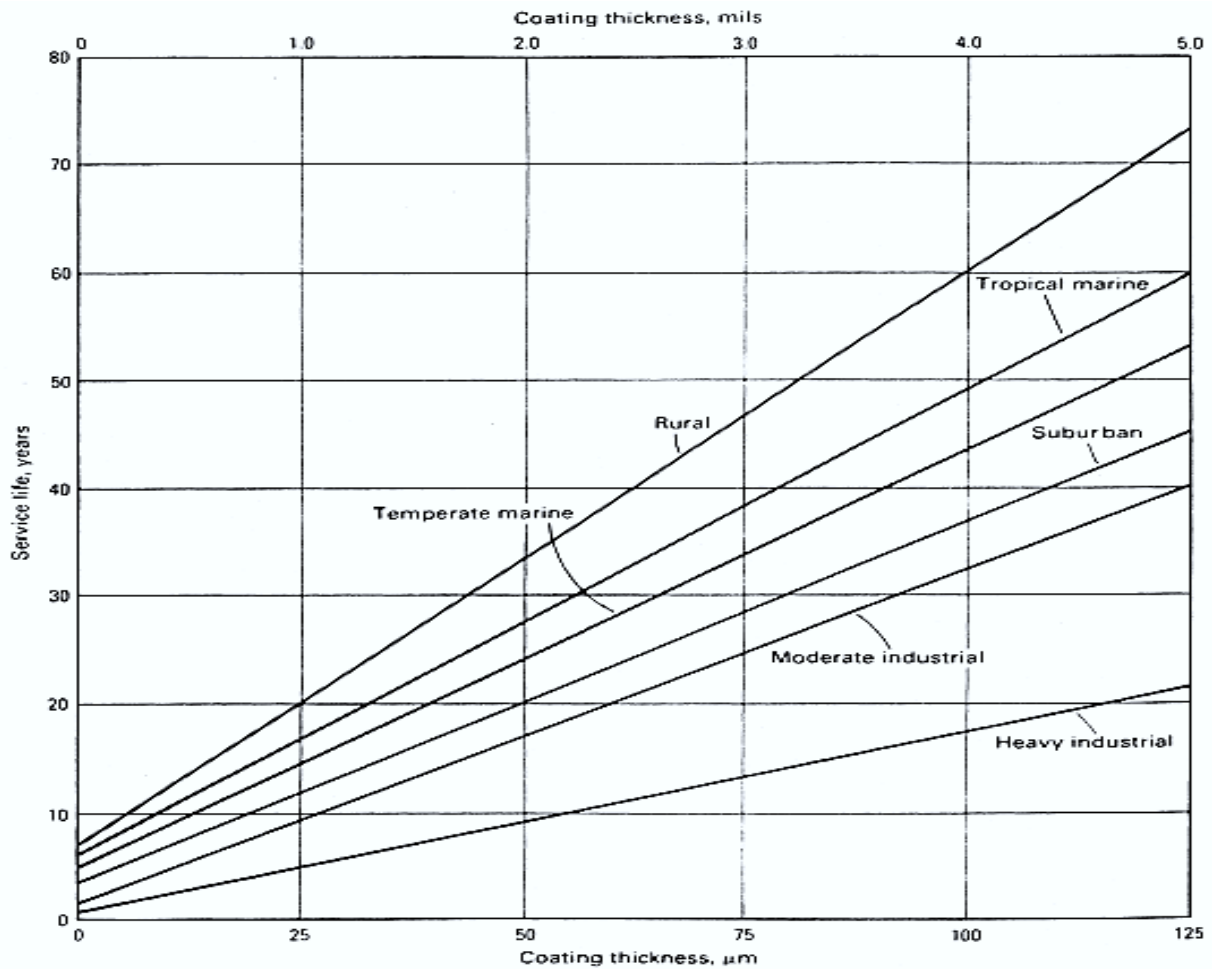
### **1.9.2.- Mecanismos de protección**

La unión metalúrgica del recubrimiento galvanizado constituye una barrera impermeable que protege al acero del efecto del medio ambiente. Además de la protección por barrera, el galvanizado en caliente es el único proceso que brinda protección catódica al acero.

La protección de barrera se da debido a que en la superficie de zinc se forma una capa fina de óxidos de zinc, esto se debe a que el  $\text{CO}_2$  de la atmósfera reacciona con el zinc dando como resultado  $\text{ZnCO}_3$ , el cual tiene la característica de ser insoluble al agua y evita la formación de otros productos de corrosión.

La protección catódica que se proporciona al acero es debido a que el zinc es más anódico que el acero en diferentes medios. Esta protección se puede apreciar fácilmente si se llegara a fracturar la capa de zinc dejando expuesto al acero base con lo cual el zinc actuaría como ánodo de sacrificio.

En la figura (1.9.2.1) se muestran los resultados de la exposición al aire libre del acero galvanizado en diferentes medios, esto para medir la vida útil de protección de recubrimientos galvanizados.



**Figura (1.9.2.1): Gráfica de la vida útil del acero galvanizado en caliente en diferentes ambientes. Fuente: The metallurgy of zinc-coated steel A.R. Marder.**

## Capítulo 2: Metodología experimental

### 2.1.-Circuito galvanostático

El circuito galvanostático es utilizado para los ensayos electroquímicos, el circuito ilustrado consta de un potencio-galvanostato, con el cual se controlará de forma constante el potencial o la corriente. Este necesita de cuatro variables indispensables para trabajar correctamente, un electrodo auxiliar, un electrodo de referencia, el electrodo de trabajo y un electrolito u/o puente salino. El circuito galvanostático se ilustra en la figura (2.1.1).

En la figura (2.1.1) se aprecia lo siguiente. El cable de color rojo se encuentra conectado al electrodo de trabajo, el cable verde está conectado al electrodo auxiliar (en el laboratorio de corrosión se utilizan cilindros de grafito) y el cable de color negro es el electrodo de referencia, que en este caso es un electrodo de calomelanos saturado. El potencio-galvanostato es el aparato del lado derecho con carcasa azul.

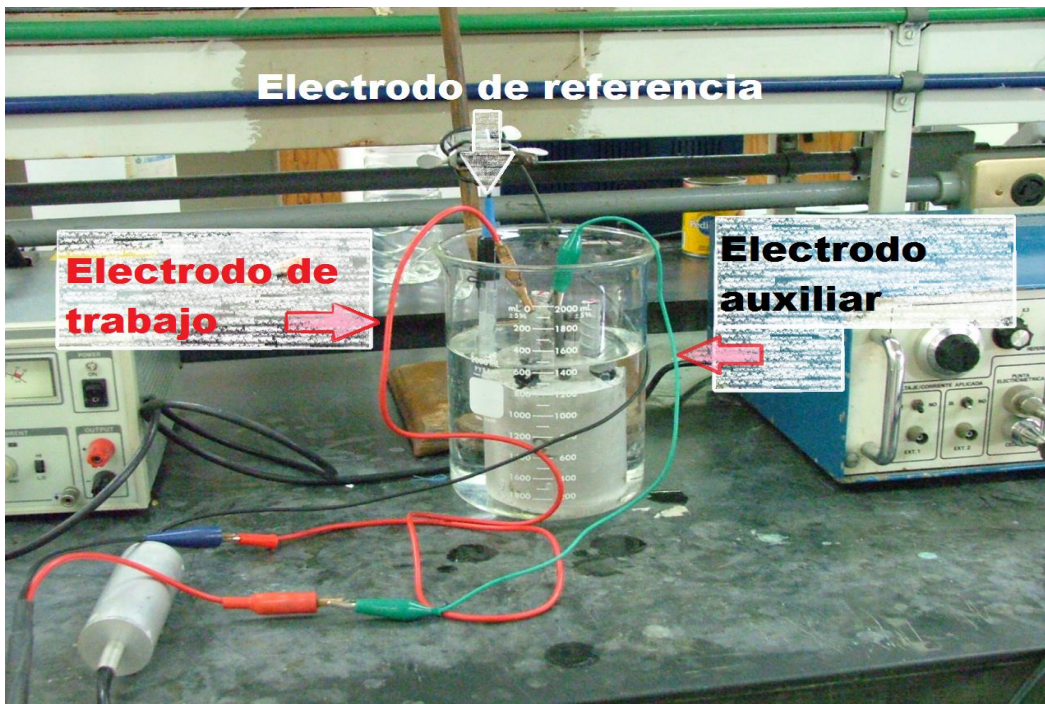


Figura (2.1.1) Circuito Galvanostático

## 2.2.-Muestras a ensayar

### 2.2.1.-Aceros estudiados

El acero estudiado para ésta tesis es un acero al carbono con bajo y medio contenido de carbono y un acero galvanizado por inmersión en caliente. Debido a que el acero galvanizado fue donado por Galvaqro S.A. de C.V. cumple con la norma mexicana NMX-H-004-SCFI-2008 para aceros galvanizados por inmersión en caliente.

De acuerdo a la norma ASTM A42, la cual está referida a los aceros para la construcción. El acero debe de cumplir con la siguiente composición química:

Elemento	Contenido en %
<b>Carbono</b>	0.4148
<b>Manganeso</b>	0.5582
<b>Silicio</b>	0.08843
<b>Azufre</b>	0.03310
<b>Potasio</b>	0.02113
<b>Cobre</b>	0.02496
<b>Níquel</b>	0.02969

A continuación se presenta la prueba que se realizó al acero de refuerzo estudiado la cual lleva por nombre: "Identificación de metales por prueba de chispa" llevada a cabo en la facultad de Química de la UNAM. Y la cual registró la siguiente composición química:

Elemento	Contenido en %
<b>Carbono</b>	0.4148
<b>Manganeso</b>	1.173
<b>Silicio</b>	0.2407
<b>Azufre</b>	0.0407
<b>Potasio</b>	0
<b>Cobre</b>	0.2935
<b>Níquel</b>	0.0910

Con lo cual se puede corroborar que el acero usado para el presente trabajo tiene un exceso en el Magnesio, Silicio y Níquel, de acuerdo a la composición química que presenta la norma ASTM A42, los demás componentes están en un parámetro aceptable.



### 2.2.2.-Preparación de las muestras

La preparación de las muestras consistió en cortar los cilindros de acero mediante una cortadora eléctrica con las siguientes medidas: un largo de 15 [cm] y un diámetro de 0.95 [cm], esto para las varillas de acero negro (acero con óxido negro proveniente de los procesos de manufactura) y acero decapado. Mientras que para las varillas de acero galvanizado se tiene un largo de 15 [cm] y un diámetro de 1.2 [cm].

Para el acero negro se procuró adquirir esta varilla con este tipo de óxido, el cual posee la siguiente composición química  $Fe_3O_4$  este acero se limpió únicamente con acetona para eliminar cualquier impureza de su superficie.

Para el acero decapado se utilizó el mismo acero negro, pero se realizó el proceso de decapado, el cual consiste, en sumergir el acero en una solución de ácido clorhídrico diluido con agua destilada y un inhibidor. Durante un periodo máximo de inmersión en esta solución no mayor de 10 min, en seguida de esto la varilla es lavada en agua corriente, después con agua destilada y al final con acetona para evitar que siga la reacción en el acero. Este proceso de decapado fue únicamente para obtener una superficie diferente en el acero de refuerzo.

Al acero galvanizado por inmersión en caliente solo se le realizó una limpieza de desengrasado.

Dejando limpias y secas las probetas, se realizó un pintado con pintura epóxica, esto solo para poder delimitar y controlar el área donde se llevaran las pruebas a realizar, la figura (2.2.2.1) muestra en que partes se realizó el pintado y las longitudes que se pintaron.

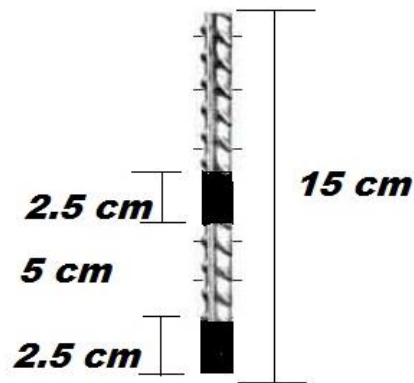


Figura (2.2.2.1) varilla con pintura epóxica

### 2.3.-Descripción del proceso de resistencia a la polarización ( $R_p$ )

Para realizar un estudio experimental de resistencia a la polarización lo mejor es acudir a la norma ASTM G59-97 “Practica estándar para realizar medidas de Resistencia a la Polarización Potenciodinámica”.

- Lo primero que se debe realizar es poner en funcionamiento el Potenciostato/ Galvanostático 15 minutos antes de realizar cualquier prueba, esto para evitar caídas óhmicas durante su uso. En el laboratorio de corrosión se cuenta con varios de estos equipos de la marca Electrónica VIMAR. La figura (2.3.1) muestra como es este equipo.
- Armar la celda electroquímica, la cual debe llevar, un electrodo de trabajo, un electrodo auxiliar, un electrodo de referencia y un electrolito.
- Habiendo dejado pasar los 15 minutos desde que empezó a funcionar el VIMAR se empieza a realiza la calibración correspondiente del equipo VIMAR. La cual se realiza con una resistencia de 100  $[\Omega]$  y aplicando un sobrepotencial de  $\pm 20$  [mV]. Y aplicando la ley de Ohm. Tenemos una salida de 200 $[\mu A]$ . teniendo el valor de 200  $[\mu A]$  en el display del VIMAR, procedemos a conectar, el electrodo de referencia, el electrodo auxiliar y el electrodo de trabajo al VIMAR. Para realizar la conexión al VIMAR de manera correcta este tiene 3 cables de distinto color, el cable con la punta

de color negro es para nuestro electrodo de trabajo, la punta de color rojo es para nuestro electrodo auxiliar y la punta extensiométrica la cual es metálica es para el electrodo de referencia.



**Figura (2.3.1): Potenciostato/ Galvanostático VIMAR**

- Habiendo realizado las conexiones pertinentes, empezamos con nuestra prueba la cual consiste en aplicar 20 [mV] positivos y luego 20[mV] negativos a nuestro potencial de corrosión. Habiendo aumentado los 20[mV] tanto catódicos como anódicos registramos el valor de la corriente que se registra en el VIMAR para esa probeta, esto se realiza así para cada una de las varillas, el total se tienen 27 varillas. Pero se intercalaron las mediciones a 12 varillas se les hacía mediciones en días pares y a 15 en días nones.

## **2.4.-Pruebas de calidad para el acero galvanizado**

### **2.4.1.-Localización del espesor más delgado en acero galvanizado o ensayo de Preece**

Este tipo de prueba de calidad como su nombre lo indica mostrará en que parte u/o partes de la varilla galvanizada se encuentra el espesor más delgado del recubrimiento de zinc, debido a que el acero galvanizado por inmersión en caliente no presenta una homogeneidad en su superficie. Esta prueba se llevó a cabo siguiendo la norma ASTM A239-95. Esta norma sólo contempla aceros galvanizados por inmersión en caliente y electrochapado o espray.

Para empezar con esta prueba lo primero que se realiza es preparar las muestras a ensayar. Lo cual consistió en limpiar 3 varillas galvanizadas de 3 [cm] de largo y un diámetro de ½ pulgada. (1.27 [cm]).

Preparar una solución de sulfato de cobre saturada, ésta solución se preparó de acuerdo a la norma ASTM A239-95 la cual indica lo siguiente.

- 36 partes en peso de sulfato cúprico ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ). en 100 partes de peso de agua destilada.
- Para tener una mezcla homogénea de ésta solución se recomienda elevar la temperatura del agua y agitar constantemente.

Teniendo la solución preparada se realiza lo siguiente:

- ✓ Sumergir una probeta en la solución de sulfato de cobre durante 1 minuto.
- ✓ Terminado ese minuto, se enjuaga la probeta con abundante agua y se inspecciona la probeta, para determinar los depósitos de cobre que se hayan formado en su superficie.
- ✓ Después de haber realizado la inspección visual la probeta se limpia con acetona y agua destilada para poder sumergir nuevamente la probeta las veces necesarias, hasta visualizar depósitos de cobre considerables y los cuales no se desprendan cuando se estén limpiando.

- ✓ Los depósitos de cobre en la superficie de la probeta eran tallados con una goma, para asegurarse que estuviesen bien adheridos al acero y no al zinc.

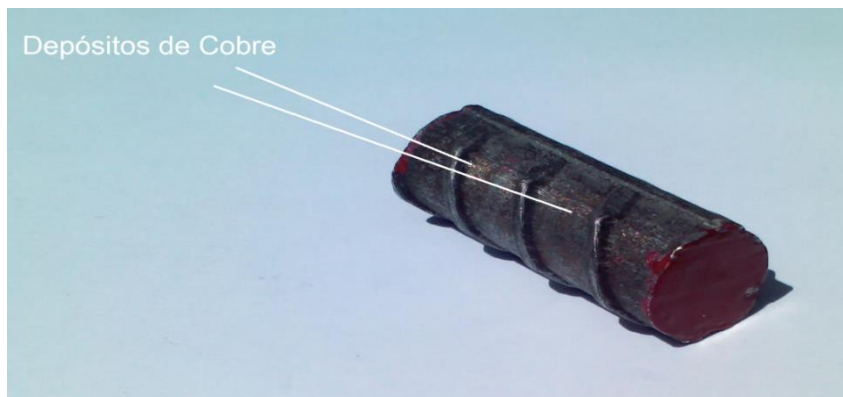
Para las probetas el número máximo de inmersiones fueron 3, los depósitos de cobre eran más frecuentes en los rebordes, donde había geometrías muy agudas.

En la primera inmersión los depósitos de cobre eran muy pocos y empezaban en los rebordes de la varilla, además de que toda la probeta cambio a un color café oscuro.

Para la segunda inmersión los depósitos de cobre, eran ya más claros en los rebordes de la varilla y empezaban a formarse también en la parte central de la varilla.

Para la tercera inmersión los depósitos de cobre en los rebordes ya eran más grandes y se apreciaba el color característico del cobre el cual es rojizo brillante. En la parte central de la varilla se presentaban depósitos de cobre de mayor tamaño.

En la figura (2.4.1.1.) veremos los depósitos de cobre formados en la varilla galvanizada.



**Figura (2.4.1.1.): Imagen de los depósitos de cobre en la varilla de acero galvanizado.**

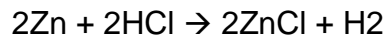
En la figura (2.4.1.1.) podemos notar claramente los depósitos de cobre formados en la varilla galvanizada debido al color característico del cobre el cual tiene una tonalidad amarillo-rojiza brillante.

### **2.4.2.-Práctica de $g/m^2$**

Este ensayo está relacionado con el apéndice X2. STANDARD FOR COMPARISON de la norma ASTM A239-95.

El ensayo consiste en limpiar y pesar las probetas, después de esto sumergir las probetas en ácido clorhídrico y sacar inmediatamente cuando el burbujeo desaparezca.

La reacción del zinc y el ácido clorhídrico liberan hidrogeno esto se debe a lo siguiente:



La reacción del zinc y el ácido clorhídrico produce mucho burbujeo y es demasiado rápida e inclusive se puede ver el desprendimiento del hidrogeno por encima del ácido clorhídrico.

Los datos de las probetas a ensayar son los siguientes:

- 3 probetas de 3 [cm] de largo y un diámetro de 1.2 [cm]. masa de 30.0606 g, 29.9788 [g] y 30.4093 [g] respectivamente, y área de 11.9694  $cm^2$  de recubrimiento de zinc.

Después de sumergir las probetas de acero galvanizado en el ácido clorhídrico se obtuvieron los siguientes resultados:

- Un peso de 28.6083 gr, 28.5392 gr y 28.9341 gr.
- Por lo tanto la diferencia en peso de cada una de las probetas es de 1.4523 gr, 1.4396 gr y 1.4752 gr.

Por lo tanto se obtuvo que para cada una de estas probetas la prueba de calidad de  $gr/m^2$  seria de:

1. 0.121334 [gr/cm<sup>2</sup>] o 1213.344 [gr/m<sup>2</sup>]
2. 0.120273 [gr/cm<sup>2</sup>] o 1202.733 [gr/m<sup>2</sup>]
3. 0.123224 [gr/cm<sup>2</sup>] o 1232.476 [gr/m<sup>2</sup>]

Promediando los 3 valores anteriores, se tendría una pérdida de masa de 1,216.1843 [gr/m<sup>2</sup>]. Esta pérdida de masa le corresponde al recubrimiento de zinc que poseen las probetas de acero galvanizado. De acuerdo al ASM Metal Handbook el cual nos indica que si, se tienen 305 gr/m<sup>2</sup> de zinc es igual a obtener un espesor de 45 [μm] una onza de zinc/ ft<sup>2</sup> es equivalente a 1.7 milímetros de espesor por lo tanto 100 gr/m<sup>2</sup> de zinc es igual a tener 14 [μm].

Realizando una interpolación lineal con los datos obtenidos se tiene el siguiente espesor en las probetas de acero galvanizado:

$$X = 45 - \left( \frac{305 - 1216.18}{305 - 100} \right) (45 - 14)$$

$$X = \pm 182 \text{ [}\mu\text{m] de espesor.}$$

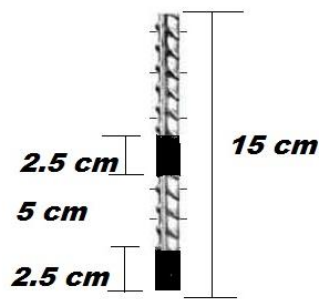
Con lo cual se tiene un acero galvanizado por inmersión en caliente con un espesor considerable, cabe aclarar que éste espesor es solo una aproximación.

## **2.5.-Probetas de pasta de cemento**

### **2.5.1.-Probetas de acero de refuerzo embebidas en cemento**

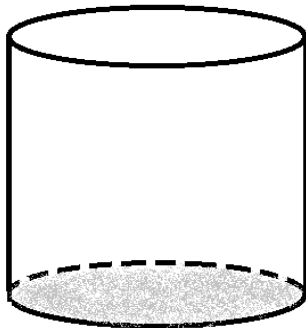
A continuación se describe el proceso de fabricación de las probetas embebidas en cemento.

Como ya se había hecho mención anteriormente el acero de refuerzo fue cortado en cilindros de 15 [cm] de largo y se les colocó pintura epóxica como lo muestra la figura (2.5.1.1)



**Figura (2.5.1.1.): Varilla con pintura epóxica.**

Después de esto se cortó un tubo de PVC de 3 pulgadas de diámetro (75 mm) y con una altura de 10 [cm], Como se muestra en la figura (2.5.1.2). A estos cilindros se les colocó cinta adhesiva, la cual tenía una función de tapa, para evitar que se escurriera el cemento.

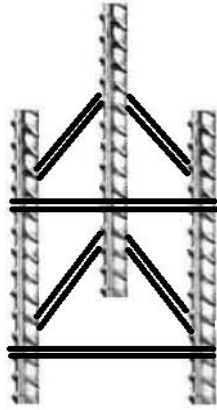


**Figura (2.5.1.2): Cilindros de PVC**

Las probetas debían tener una distancia de separación de 1 [cm], entre la pared de PVC y la probeta.

Por lo cual se realizó un pequeño armado, el cual se muestra en la figura (2.5.1.3), esto para garantizar el centímetro de separación deseado y además de poder realizar por triplicado las medidas de potencial y  $R_p$ .





**Figura (2.5.1.3): Armado de varillas**

Habiendo armado todas las varillas, éstas se insertaron dentro de los cilindros de PVC ya descritos, se realizó la mezcla de agua cemento, la cual contendría una relación de  $A/C$  (agua/cemento) = 0.4 esto es 40 [g] de agua por 100 [g] de cemento. Esta relación se escogió para evitar una gran porosidad en las probetas y es la cantidad mínima para la hidratación del cemento. Cada probeta de cemento cuenta con tres testigos de acero de refuerzo lo cual implica realizar 27 mediciones de potencial de corrosión y 27 mediciones de corriente de salida y así calcular su  $R_p$ . En la parte central de las probetas de cemento se colocó una barra de grafito el cual sirve como electrodo auxiliar.

Las probetas finalmente quedaron como se muestran en la figura (2.5.1.4).

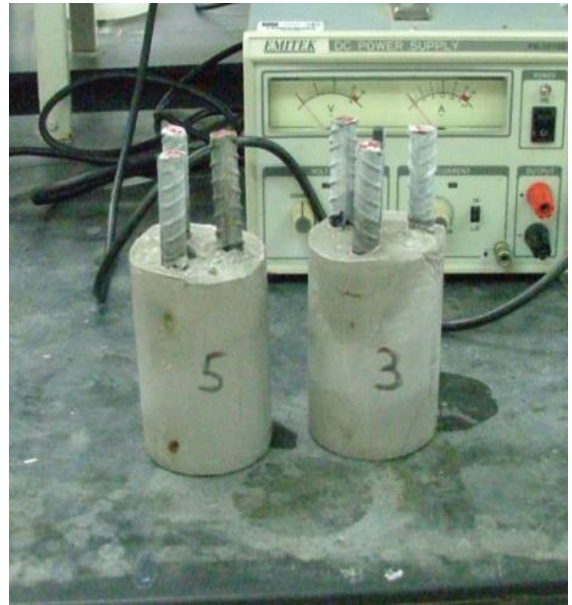


Figura (2.5.1.4): Probetas finales de acero de refuerzo embebidas en pasta de cemento.

## Capítulo 3: Análisis de Resultados

### 3.1.-Acero negro

#### 3.1.1.-Potencial de corrosión (mV vs ECS) del acero negro en los 28 días de curado

En una vista general de la figura (3.1.1.1)  $E_{corr.}$  (mV Vs ECS) se aprecia una tendencia del potencial a valores más negativo, durante el periodo de curado del cemento. Sin embargo, al término del monitoreo en el día 28 se distingue una dispersión en el potencial de corrosión, en un amplio intervalo de valores, el cual iba de los -80 [mV] a los -320 [mV].

Las mediciones de potencial se reprodujeron 9 veces en cada día de registro.

Para las probetas de acero negro, en el primer día de registro los potenciales eran coincidentes los cuales oscilaban en un rango de valores de -100 [mV] a -150 [mV].

Pero en el cuarto día hubo una variación en 6 de las 9 probetas, ya que éstas aumentaron su potencial en forma positiva, llegando a alcanzar valores de -50 [mV] a -110 [mV], mientras que las 3 probetas restantes siguen oscilando en valores de potencial de -180 [mV] a -230 [mV].

Del día 7 al día 11, el potencial de todas las probetas empiezan a seguir una tendencia a valores negativos con respecto a los registrados en el día 4, los valores de potencial en el día 7 empiezan en -70 [mV] y estos siguen disminuyendo día a día hasta el día 11 donde los valores de potencial alcanzan los -310 [mV]

En la figura (3.1.1.1) se muestra el comportamiento del potencial el cual se encuentra en una zona anódica indicando corrosión en las probetas y esto se puede comprobar en el Diagrama de Pourbaix de acero-agua.

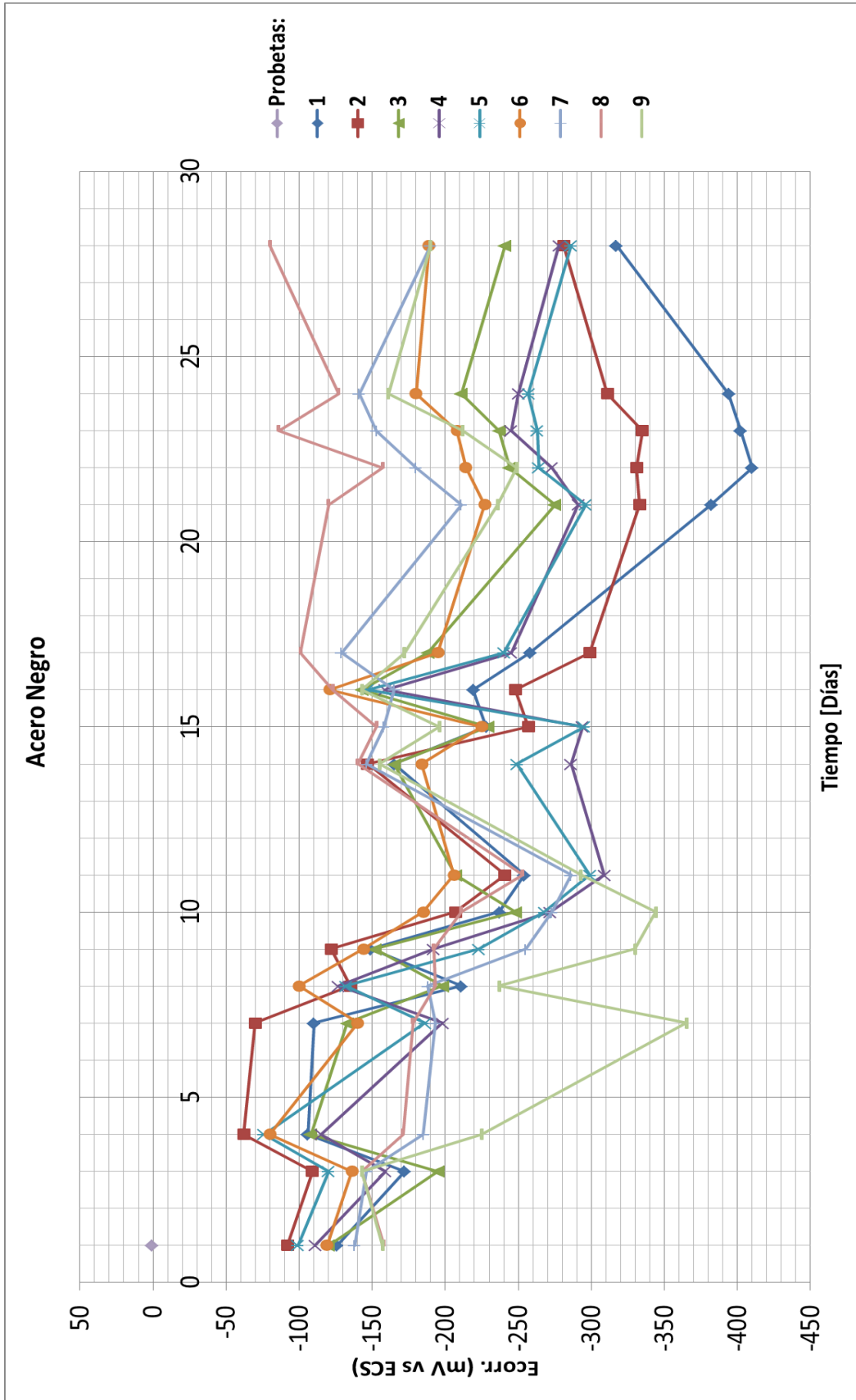


Figura (3.1.1.1): Gráfica del Ecorr. (mV Vs ECS) del Acero negro para los 28 días de curado.

### **3.1.2.-Resistencia a la polarización (Rp) en el acero negro durante los 28 días de curado**

En el acero negro se observa en la figura (3.1.2.1) que las Rp durante los 28 días del monitoreo presentan un intervalo de valores muy estrecho.

En el día 1 obtuve valores de Rps del orden de los 27,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] a los 50,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] y en los días siguientes el intervalo de valores incrementó, obteniendo valores de Rp del orden de 27,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] a 70,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ], este intervalo de valores se mantuvo para los 28 días del monitoreo, excepto para 2 probetas.

La probeta marcada con el número 8 la cual registro valores de Rp muy altos como se muestran en la figura (3.1.2.1) el valor de Rp más bajo se encuentra en los 80,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] y el valor más alto en los 200,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]. La otra probeta que se alejó del intervalo de los 27,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] a los 70,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] fue la marcada con el número 5 la cual alcanzo una Rp del orden de los 90,000 a los 160,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]. Dejando de lado las probetas 8 y 5 se aprecia con la tendencia de mantener una salida de corriente constante por parte de las otras probetas, para poder mantener los valores de Rp obtenidos.

Aunque, en la superficie del acero negro se tiene  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  con un espesor aproximado de 100,000 [ $\text{Å}$ ] <sup>[Ref. 4]</sup> éste permite cierta estabilidad en la superficie del acero de refuerzo la cual evita una corrosión más severa al acero de refuerzo.

Los valores de Rp conseguidos durante este monitoreo, indican que el acero de refuerzo sufre una corrosión mayor durante los primeros días de curado del cemento y para el final del monitoreo, a partir del día 21 al 28 la corrosión disminuye.

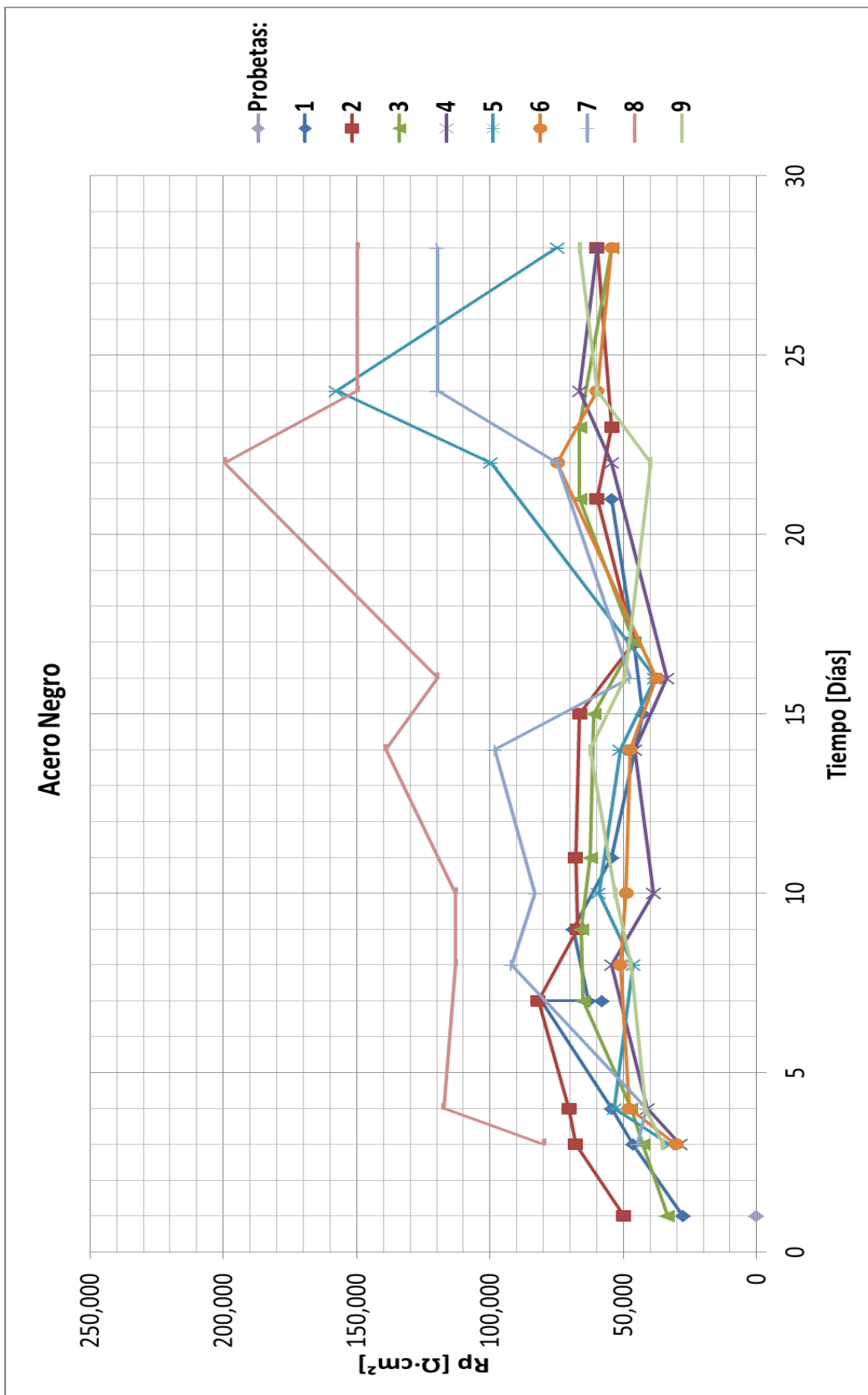


Figura (3.1.2.1): Gráfica de Rp del Acero Negro para los 28 días de curado.

### 3.1.3.-Potencial de corrosión (mV Vs Cu/CuSO<sub>4</sub>) del acero negro para los 28 días de curado.

Para tener una mejor predicción del potencial de corrosión se consultó la norma ASTM C 876 – 09 **“Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete”**.

En la cual como su nombre lo indica, es una técnica para determinar el potencial de corrosión del acero de refuerzo en concreto, la cual sugiere utilizar un electrodo de referencia de cobre sulfato de cobre. Ésta norma nos puede dar una estimación de si puede o no existir corrosión solo conociendo el potencial de corrosión del acero de refuerzo. La norma da las siguientes estimaciones dependiendo del potencial medido. De 0 a -200 [mV] 10 % de probabilidad de corrosión, de -200 [mV] a -350 [mV] incertidumbre o 50% de que exista corrosión y potenciales menores que -350[mV] 90% de Probabilidad de corrosión.

Las mediciones que realice fueron hechas con un electrodo de calomelanos, el cual es un electrodo con potencial estable y reversible, lo que implica que tuve que realizar una conversión de potencial y pasar de un potencial de ECS a Cu/CuSO<sub>4</sub>. En la Figura (3.1.3.1) se puede apreciar el comportamiento del potencial de corrosión para los 28 días de curado de las probetas. Desde el primer día de medición se aprecia que existe un 10 % de probabilidad de que el acero de refuerzo sufra corrosión, sin embargo para este mismo día de medición hay también un par de probetas en la zona de incertidumbre, este tipo de comportamiento en las probetas se mantiene así hasta el día 9. Después del décimo día y hasta el día 28 la mayoría de las mediciones de potencial realizadas se encuentran en la zona de incertidumbre.

A partir del día 21 y hasta el día 28 solo 2 probetas del monitoreo se colocan en la probabilidad del 90% de sufrir corrosión.

Sobre éste método, debe considerarse que es solo una estimación en porcentaje de que las probetas ensayadas puedan sufran o no algún tipo de corrosión, también cabe resaltar que no indica que tipo de corrosión se presenta en el acero o el daño que el acero presenta debido a la corrosión.



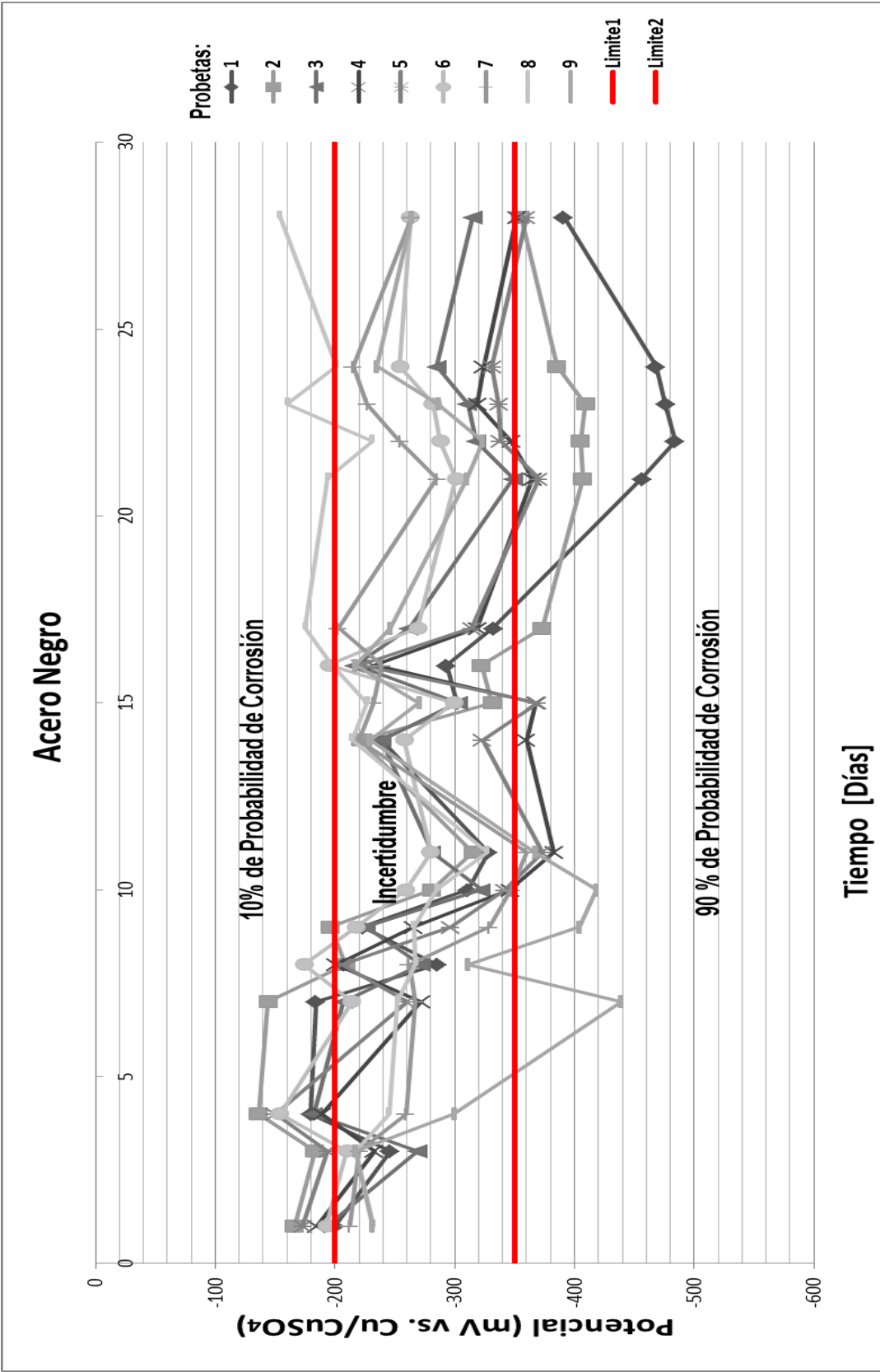


Figura (3.1.3.1): Gráfica del potencial de corrosión (mV Vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>) del Acero Negro para los 28 días de curado.



## **3.2.- Acero decapado**

### **3.2.1.-Potencial de corrosión (mV vs ECS) del acero decapado en los 28 días de curado**

En el acero decapado en el día 1 del monitoreo los valores de potencial son más activos en comparación con el acero negro, esto puede ser debido a la formación de óxido férrico, en la superficie del acero decapado.

En el día 1 el acero decapado registro valores de potencial de -140 [mV] a -390[mV]. Sin embargo, para los días 3 y 4 los valores de potencial se mantuvieron en un intervalo más reducido llegando a valores de -180[mV] a -290 [mV].

Del día 7 al 11 el potencial registra valores más negativos los cuales van de -200 [mV] a -300 [mV], pero las probetas marcadas con los números 5,6 y 8 salen de éste margen de potencial, incluso en el día 11 la probeta número 6 alcanzó un potencial de -580[mV], lo cual supone una mayor oxidación en su superficie.

Para los días 7 al 17 existe una variación en el potencial de corrosión de las varillas decapadas esto se debe principalmente a la inestabilidad de la superficie, la cual deja expuesto completamente al acero de refuerzo al cemento, y aunque el cemento fragua en menos de 24 horas las reacciones de hidratación en él están presentes principalmente en los primeros 28 días.

Este tipo de variación en el potencial puede deberse a que en la superficie del acero exista una formación de óxido férrico el cual sea muy inestable, lo cual conlleva a que este óxido se forme y destruya constantemente en la superficie del acero de refuerzo produciendo las variaciones del potencial de corrosión en las probetas. En la Figura (3.2.1.1) se muestra el comportamiento del potencial del acero decapado.

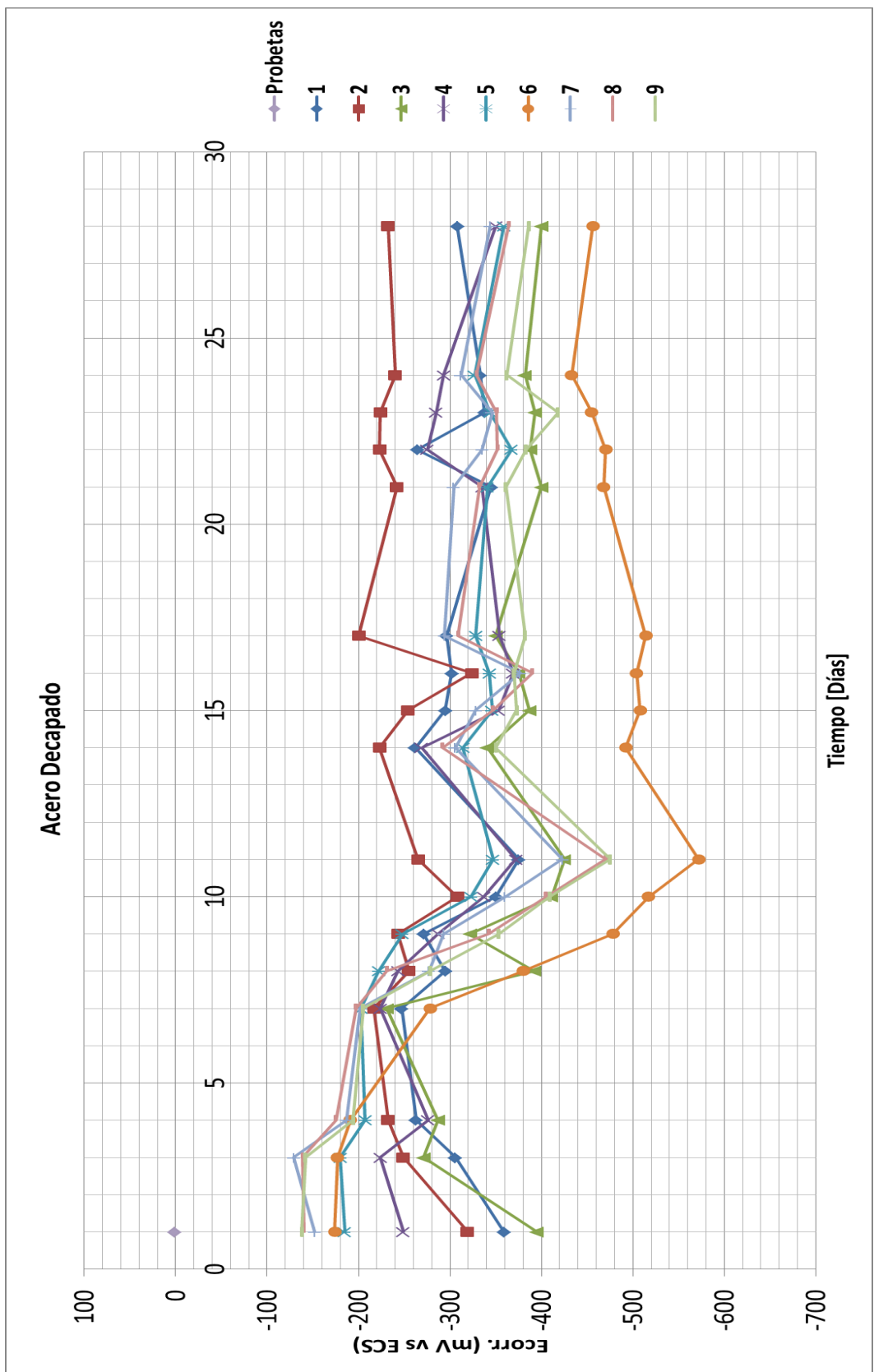


Figura (3.2.1.1): Gráfica del Ecorr. (mV Vs ECS) del Acero decapado para los 28 días de curado.

### **3.2.2.- Resistencia a la polarización (Rp) en el acero decapado durante los 28 días de curado.**

En las probetas de acero decapado, revisando la figura (3.2.2.1) se observa con claridad la inestabilidad en la superficie de las probetas, al registrar valores de corriente distantes, con lo cual se obtienen valores de Rp desproporcionados.

En el día 1 del monitoreo se obtienen valores de Rp del orden de 7,000, 50,000 y 106,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]. Dejando ver la desproporcionalidad en los valores de Rp.

Para los días siguientes, se tiene que cada una de las probetas empieza a mantenerse en diferentes valores de Rp, claro está que en muy pocas de las probetas existe un intervalo de valores donde las Rp se mantienen.

Sin embargo, aunque los valores de Rp para cada probeta son muy diferentes, en 4 de las 9 probetas existe una tendencia en los valores de Rp, esto se observa en el día 3 de registro hasta al día 22, las probetas que siguen esta tendencia son las marcadas con los números 4, 7, 8 y 9 éstas probetas se mantienen en valores de Rp del orden de los 30,000 a los 60,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]. Después del día 22 hasta el día 28 cada una de estas probetas va tomando valores diferentes para cada día de registro.

De las 9 probetas solo hay 1 que tiene valores extraños, la probeta marcada con el número 6 la cual registra muchas variaciones en su Rp durante todo el monitoreo.

Realizando una comparación entre el acero decapado y el acero negro, se aprecia la importancia superficial en cada una de estos aceros de refuerzo, esto para hacerle frente a la corrosión. Con lo cual, aunque el acero negro sólo posee  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  en su superficie es suficientes para mantener una homogeneidad en los valores de Rp lo cual se traducen en que la corrosión no será tan severa en este acero como lo puede ser en el acero decapado.

Los valores de Rp registrados, nos indican que el acero de refuerzo está sufriendo algún tipo de corrosión directamente y que esta seguirá debido a que al término del monitoreo, los valores de Rp siguen cambiando.

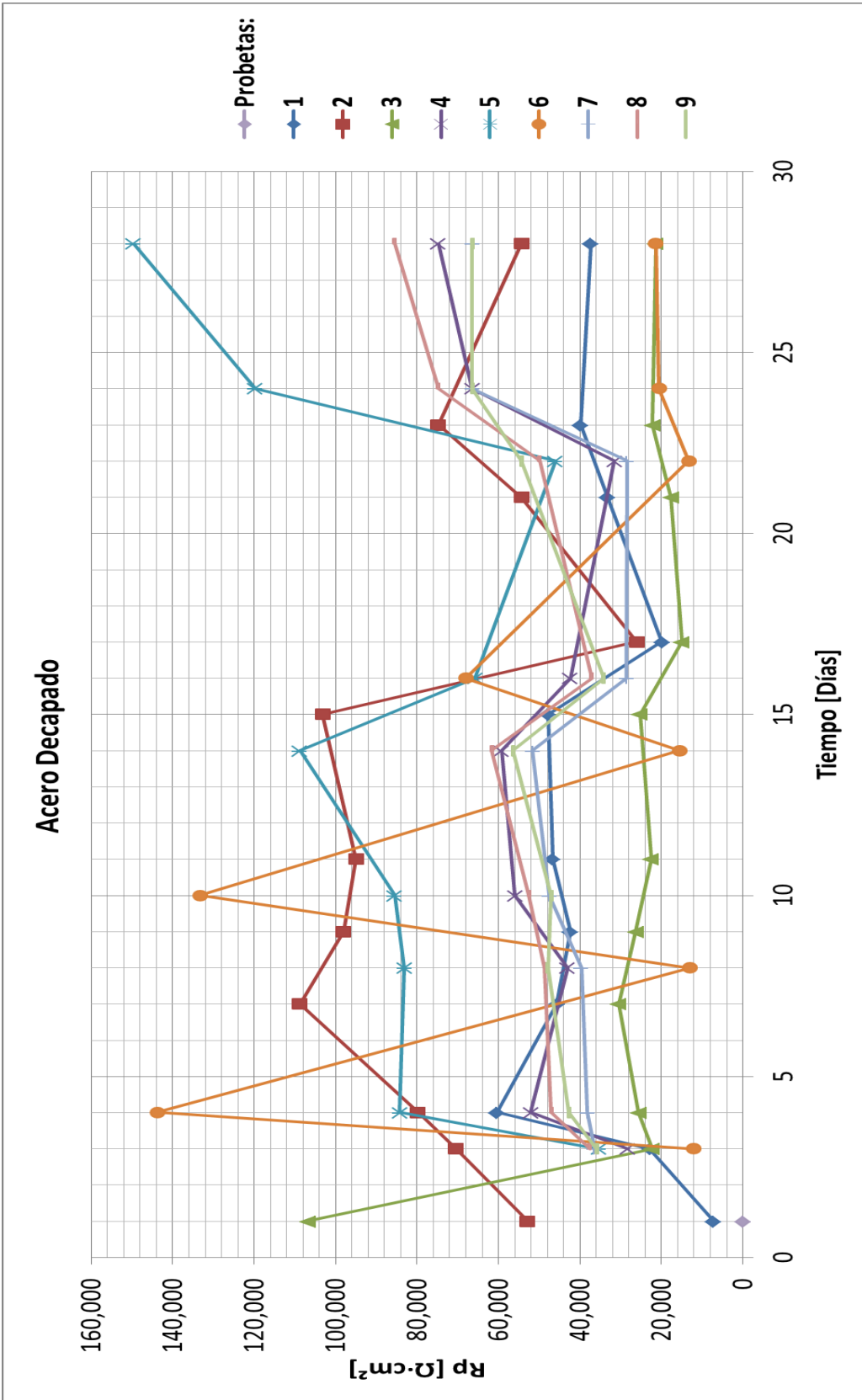


Figura (3.2.2.1): Gráfica de Rp del Acero decapado para los 28 días de curado.

### **3.2.3.-Potencial de corrosión (mV Vs Cu/CuSO<sub>4</sub>) del acero decapado en los 28 días de curado**

Como ya se había mencionado con anterioridad se utilizó la norma ASTM C 876 – 09, para estimar la corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto. Para el acero decapado se aprecia que desde el día 1, 3 de las 9 probetas se encuentran en el 90 % de probabilidad de sufrir corrosión mientras que las otras 6 probetas están en la zona de incertidumbre.

Para el día 3 al 7 la mayoría de estas probetas están en la zona de incertidumbre, sin embargo, unas pocas probetas se encuentran en el 90% de sufrir corrosión. Del día 7 al término del monitoreo, 8 de las 9 probetas se encuentra en la zona del 90% de sufrir corrosión. Esto se puede apreciar en la Figura (3.2.3.1).

La norma ASTM C876-09 es muy útil para prevenir la corrosión debido a que, aunque no hay un dato el cual nos indique el grado o tipo de corrosión que sufre el acero si nos indica la probabilidad de que exista corrosión en el acero estudiado, con lo cual se pueden realizar medidas preventivas para evitar la corrosión en el acero embebido, ya sea una protección anódica o algún recubrimiento.

Para hacer una mejor comparación del grado de corrosión que puede sufrir el acero decapado y el acero negro se insertaron los dos gráficos de las figuras (3.1.3.1) y (3.2.3.1) para obtener la figura (3.2.3.2) y así poder apreciar como el cambio en la superficie de las probetas empleadas es de gran importancia para evitar cualquier tipo de corrosión durante el curado del cemento. Ya que observando la figura (3.2.3.2) se tiene que hay muchos más puntos del acero decapado en la zona de sufrir corrosión que del acero negro.

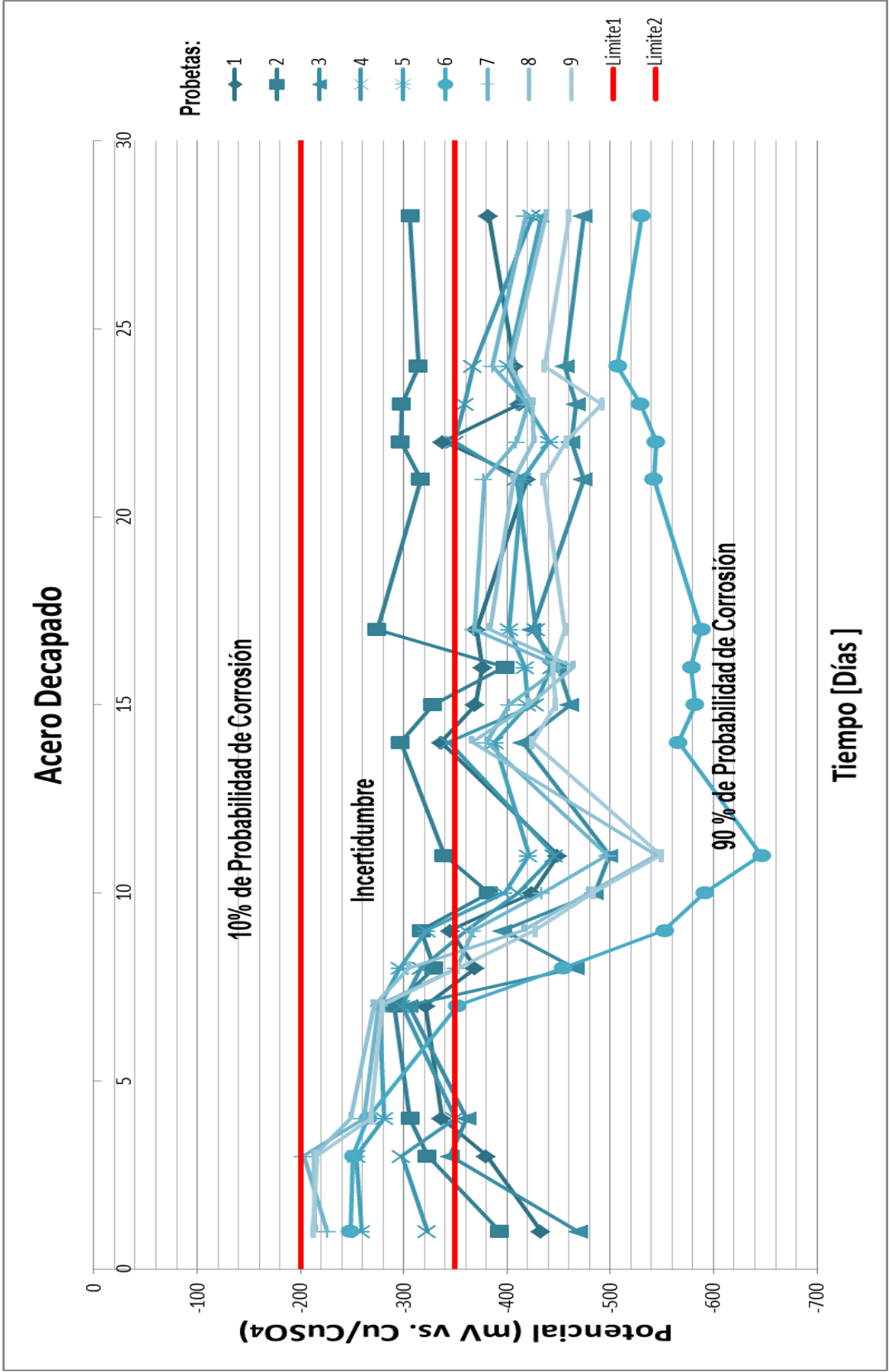


Figura (3.2.3.1): Gráfica del potencial de corrosión (mV Vs. Cu/CuSO<sub>4</sub>) del Acero Decapado.

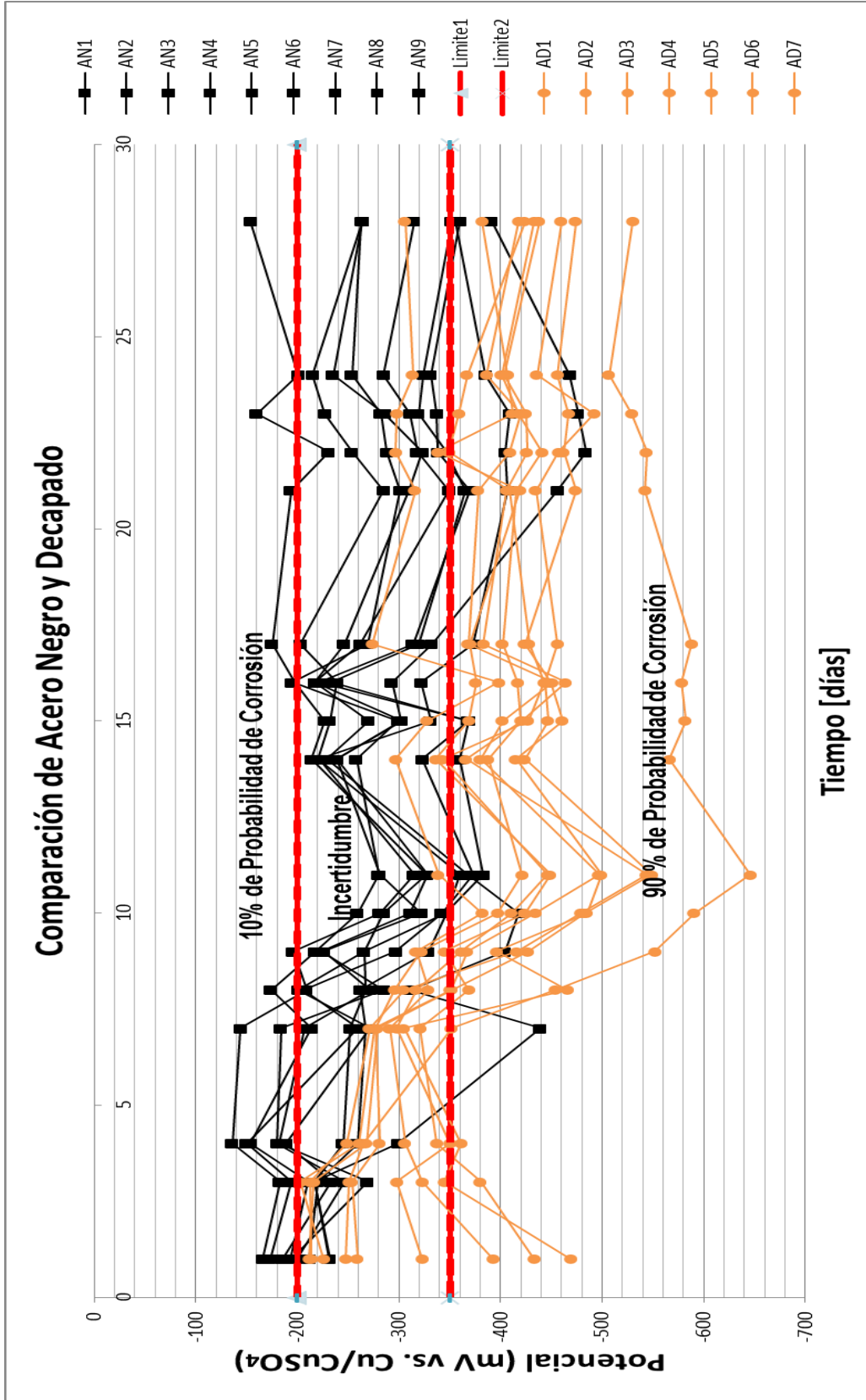


Figura (3.2.3.2). Grafica de Potencial de corrosión (mV Vs Cu/CuSO<sub>4</sub>) del acero negro y decapado.

### **3.3.- Acero galvanizado**

#### **3.3.1.-Potencial de corrosión (mV vs ECS) del acero galvanizado en los 28 días de curado**

En el día 1 el registro de potencial de corrosión se tiene que, los potenciales tienen valores muy negativos los cuales van de los -520[mV] a -1,180 [mV].Esto indica que el acero galvanizado es termodinámicamente menos estable y cinéticamente más activo.

En la Figura (3.3.1.1) se observa que en los días de registro el potencial de corrosión presenta muchas variaciones, sin embargo, en 6 de las 9 probetas se mantienen en un margen de valores de potencial de corrosión de -400[mV] a -620 [mV] estos potenciales tan anódicos indican que el potencial de corrosión sigue siendo muy activo.

Las probetas marcadas con los números 3, 7 y 9 presentan potenciales inestables, éstas 3 probetas registran variaciones en su potencial muy altas. Sin embargo, se logra apreciar que en los últimos días del monitoreo los potenciales de corrosión de todas las probetas se mantienen en un valor de potencial constante.

El comportamiento del potencial de corrosión a valores negativos indica que la disolución anódica de Zn ocurre a mayor velocidad que el proceso catódico de reducción de  $O_2$  que se lleva a cabo sobre la superficie metálica. Lo cual presenta una corrosión significativa en las probetas de acero galvanizado durante todo el proceso de curado del cemento.



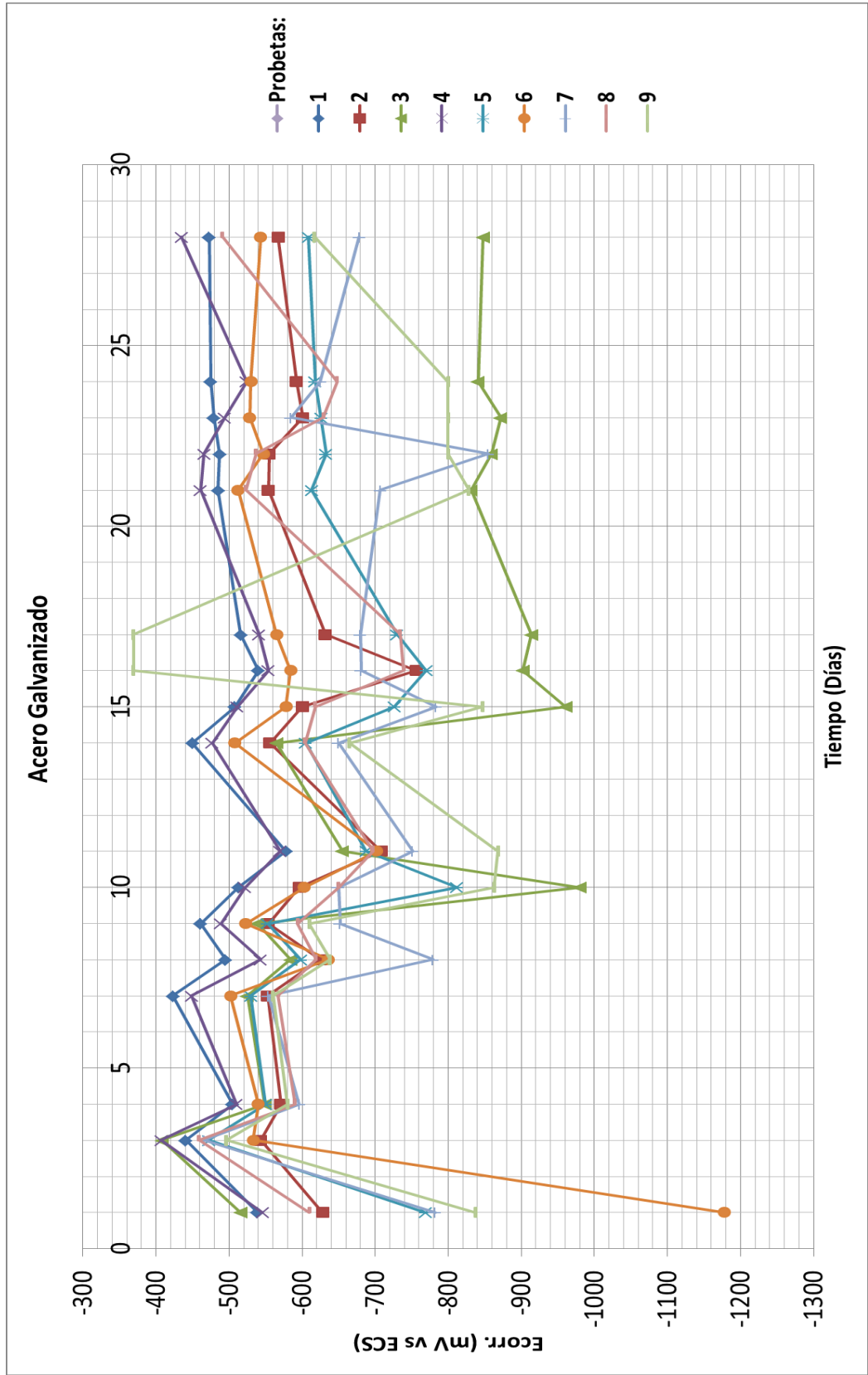


Figura (3.3.1.1): Gráfica del Ecorr. (mV Vs ECS) del Acero galvanizado.

### **3.3.2.- Resistencia a la polarización (Rp) en el acero galvanizado durante Los 28 días de curado**

Durante el primer día de pruebas los valores de Rp son bajos del orden de 1,000 a 5,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ]. En el día 3 obtuve valores de Rp de mayor magnitud del orden de 10,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] el cual duplicó al primer valor más alto registrado durante el primer día de pruebas de Rp.

En el día 7 las probetas se mantenían en valores de 5,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] a 11,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] salvo las probetas marcadas con los números 1,2 y 6 las cuales no están dentro de este margen de valores.

A partir de los días 8 al 28, seis probetas se mantienen en valores de Rp del orden de los 5,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] a los 10,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] respectivamente, no obstante la probeta N° 6 siguió una tendencia en el aumento del valor de Rp al igual que las probetas N°2 y N°1 las cuales superaron el valor de los 11,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ], si se descartan estas tres probetas ya mencionadas, habría una tendencia en los valores de Rp para los 28 días de curado del cemento, y el rango de valores estaría entre los 4,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ] y los 10,000 [ $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ], Esto se puede apreciar en la figura (3.3.2.1).

Para la figura (3.3.2.1) se tiene que, los valores más inestables se encuentran en los días 7 al 14 del monitoreo, esto puede ser debido a que en estos días hay más humedad en las probetas o que el  $\text{CO}_2$  del ambiente tiene una mayor penetración en las probetas. Con estos datos de Rp se obtendrán los resultados de la velocidad de corrosión más adelante. Con los resultados de velocidad de corrosión obtendremos la pérdida de peso en zinc que sufren las probetas y así determinar la vida útil del acero galvanizado.

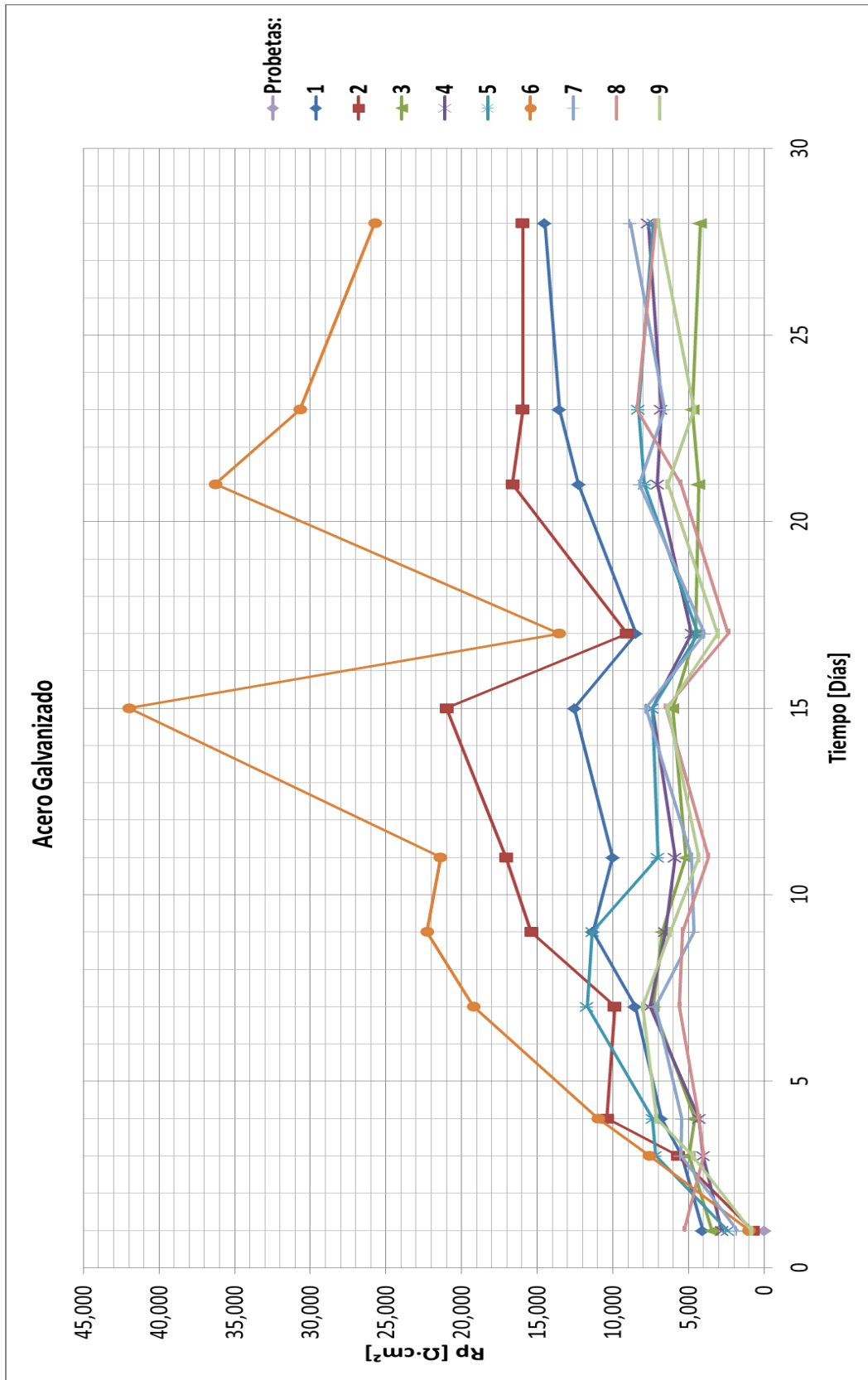


Figura (3.3.2.1): Gráfica de resistencia a la polarización del Acero galvanizado.

### 3.4.- Esquema del diagrama de Evans

#### 3.4.1.-Esquema del diagrama de Evans del acero decapado.

Para el acero decapado se realizó en la figura (3.4.1.1) un esquema del diagrama de Evans, en el cual se tiene para el eje de las abscisas  $\log |i|$  el cual representa la densidad de corriente. Y en el eje de las ordenadas el potencial de corrosión.

Cabe aclarar que cada punto gráfico en el esquema de Evans es la intersección de la rama catódica y anódica.

En el comienzo el potencial está en números negativos y sucesivamente al transcurrir el tiempo de monitoreo éste siguió dicha tendencia a valores más negativos, pero las salidas del logaritmo de la densidad de corriente oscilaban entre valores de  $-5.5$  y  $-6$  [ $A/cm^2$ ] para todo el monitoreo, esta variación en la densidad de corriente era predecible debido a los resultados obtenidos en las pruebas de Rp. El cambio en el potencial de corrosión es debido a la formación de  $Fe_2O_3$ . Como se había hecho mención el cambio más significativo es en el potencial de corrosión, con lo cual se puede decir que existe un control mixto debido a que la variación en la densidad de corriente es pequeña y el cambio en las ramas catódicas y anódicas del acero decapado es apreciable.

Si se relaciona éste esquema de Evans con el diagrama de Pourbaix hierro-agua de la figura (1.8) de esta tesis se notará que el potencial se encuentra en la zona de corrosión desde el inicio del monitoreo hasta el final, esto también se demostró con la norma ASTM C 876 – 09 solo midiendo el potencial de corrosión de las probetas ensayadas (mV vs Cu/CuSO<sub>4</sub>).

Como ya es sabido, la corriente es una variable que permite medir la velocidad de corrosión de un metal en un medio, donde un aumento en la densidad de corriente indica un incremento en la velocidad de corrosión. Para este caso más adelante se calculará la velocidad de corrosión que sufre el acero decapado con los resultados obtenidos de la densidad de corriente.

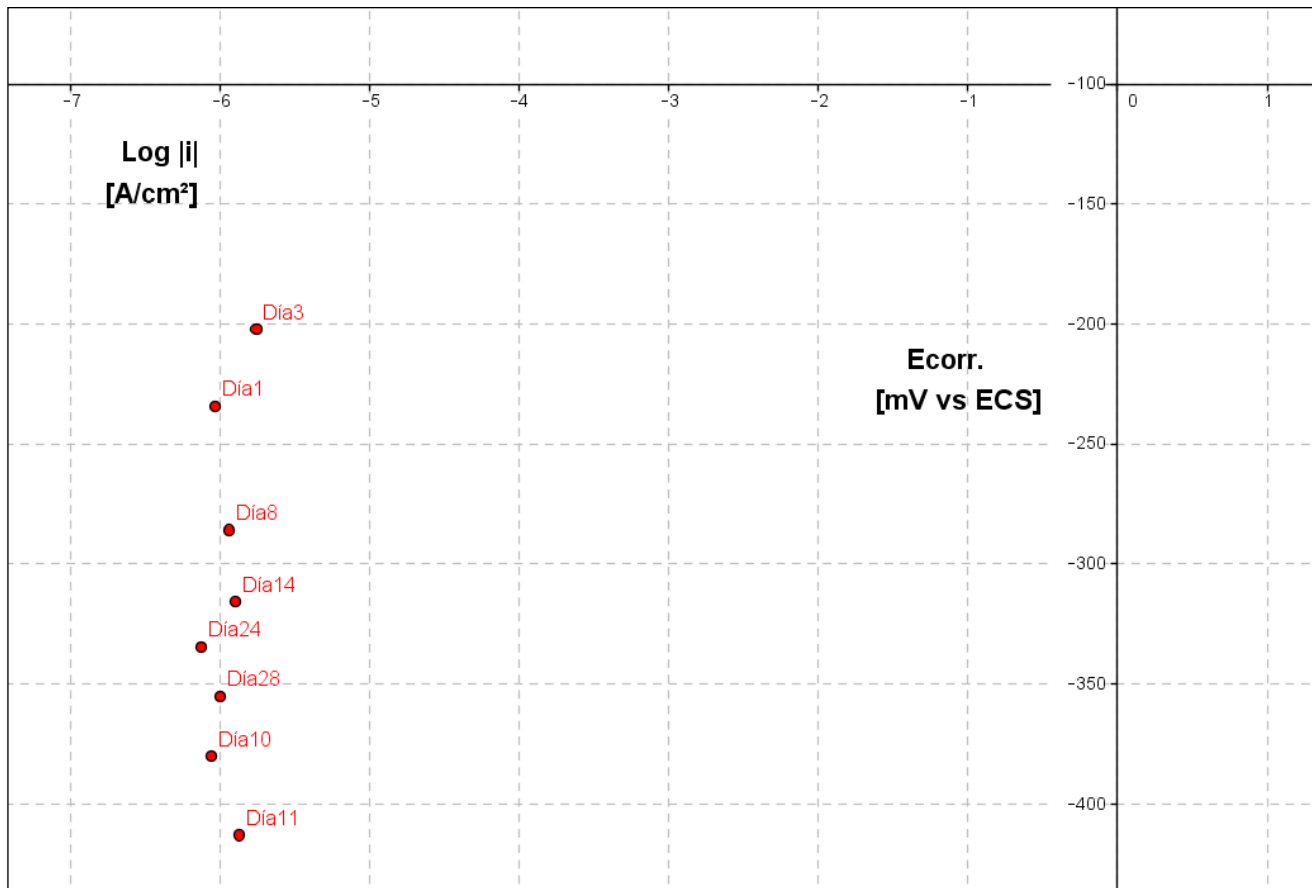


Figura (3.4.1.1) Esquema del diagrama de Evans del acero decapado.

### 3.4.2.-Esquema del diagrama de Evans del acero negro

Ahora para el acero negro se tiene también un esquema del diagrama de Evans en la figura (3.4.2.1) en la cual, al igual que en el acero decapado lo único que cambia durante el monitoreo es el potencial de corrosión.

Las salidas del logaritmo de la densidad de corriente son muy similares durante todo el registro, en la figura (3.4.2.1) se puede apreciar que éstas se encuentran en un rango de valores de -6.3 y -5.8 [A/cm<sup>2</sup>]. Al realizar una comparación con el potencial de corrosión del acero decapado se puede ver que el acero decapado tiene un potencial de corrosión más activo. Y también se podría decir que se tiene un potencial de corrosión mixto.

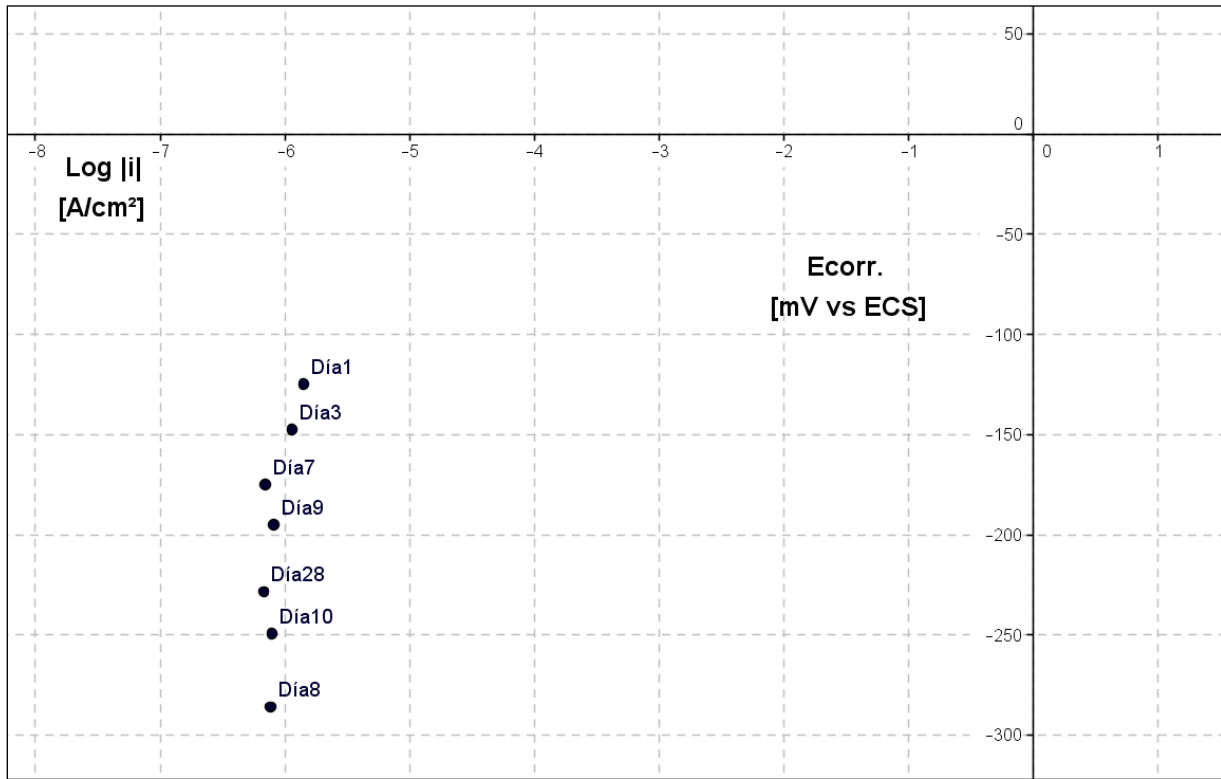


Figura (3.4.2.1) Esquema del diagrama de Evans del acero negro.

### 3.4.3.-Esquema del diagrama de Evans del el acero galvanizado.

En el acero galvanizado se tiene un esquema del diagrama de Evans en la figura (3.4.3.1).en la cual se aprecia como las salidas de  $\log|i|$  son mayores en comparacion a las registradas para el acero decapado y el acero negro.

Los valores de  $\log|i|$  del acero galvanizado presentan un mínimo de  $-4.68 [A/cm^2]$  y un máximo de  $-5.39 [A/cm^2]$ , pero durante la mayor parte del monitoreo el  $\log |i|$  oscilaba en valores de  $-5$  a  $-5.39 [A/cm^2]$  lo cual indica que se tendra una mayor velocidad de corrosión en el acero galvanizado, esto se sabe simplemente analizando los resultados de  $\log|i|$ . Algo importante que cabe destacar, es que los valores de  $\log|i|$  van decreciendo en cada día de registro por lo tanto la corrosión más severa se tendra para los primeros días del curado de cemento y para el final del curado se puede suponer que exista una formación de óxido de zinc en la superficie de las probetas el cual atenúa la velocidad de corrosión.

Una parte importante del acero galvanizado es que, aunque el recubrimiento de zinc sufriera alguna rayadura o fisura y el acero base quedara expuesto, el acero no presentaría corrosión alguna debido a que el zinc actúa como material de sacrificio.

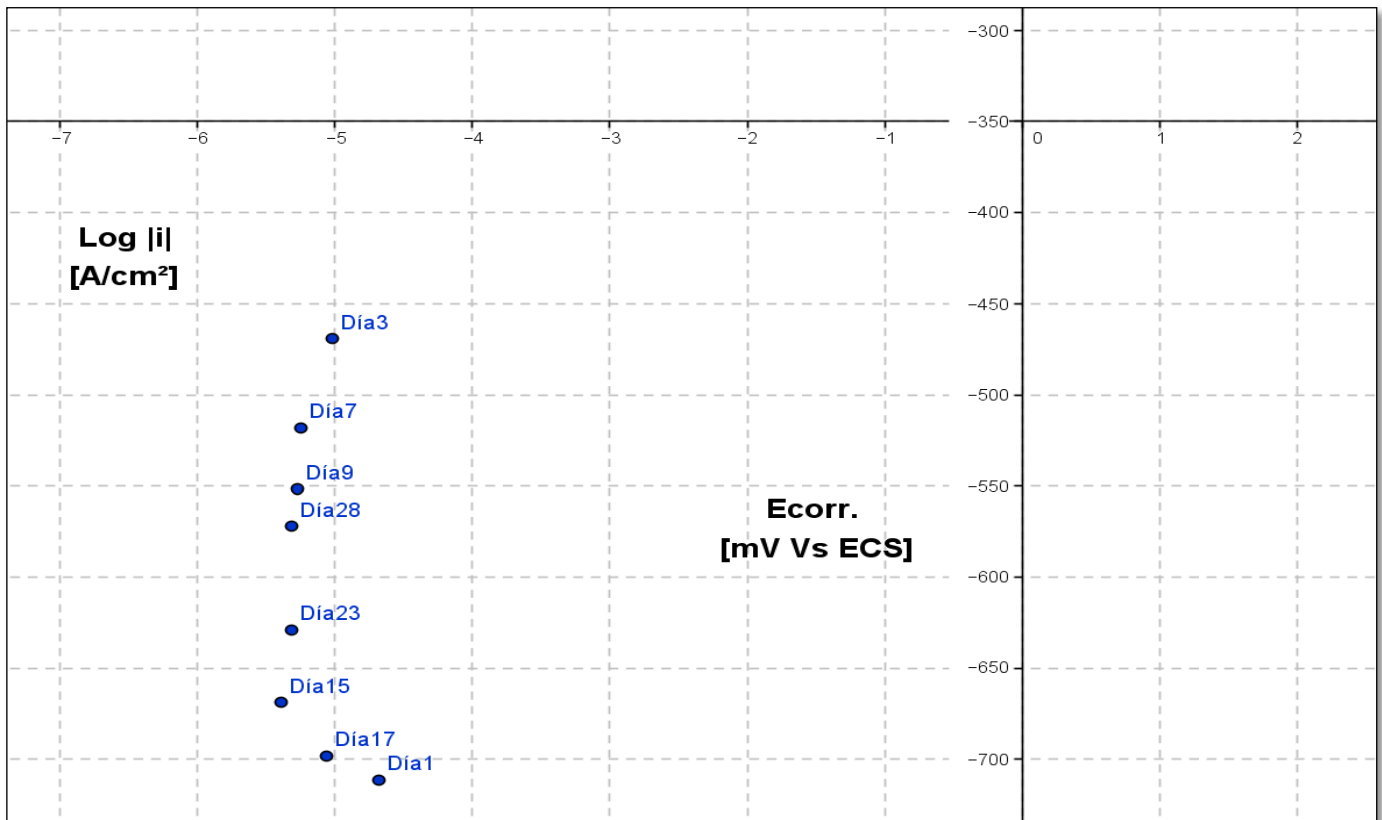


Figura (3.4.3.1) Esquema del diagrama de Evans del acero galvanizado por inmersión en caliente.

### 3.5.-Obtención de la velocidad de corrosión

#### 3.5.1.-Velocidad de corrosión del acero negro y decapado

En esta parte calcularé la velocidad de corrosión de cada uno de los aceros empleados en esta tesis, se hará un solo cálculo de la velocidad de corrosión para ejemplificar los resultados obtenidos.

De la siguiente forma se efectuaron los cálculos para la obtención de la velocidad de corrosión. El dato de  $I_{corr}$ . Pertenece al acero decapado.

VC = Velocidad de corrosión.

Equivalente gramo de Fe = 27.8 [gr]

$$I_{corr} = 9.3401 \times 10^{-7} \frac{A}{cm^2}$$

$$\frac{1 \text{ Ampere}}{cm^2} = \frac{\text{coulombio}}{cm^2 \cdot s} = \frac{1}{96500} = \frac{\text{Equiv. gr de Fe}}{cm^2 \cdot s}$$

$$VC = (9.3401 \times 10^{-7}) \left( \frac{1}{96500} \right) (27.8)$$

$$VC = 2.6907 \times 10^{-10} \left[ \frac{gr}{cm^2 \cdot s} \right]$$

La Densidad del Fe = 7.86 [gr/cm<sup>3</sup>]

$$VC = (2.6907 \times 10^{-10} \left[ \frac{gr}{cm^2 \cdot s} \right]) \left( \frac{1 \text{ cm}^3}{7.86 \text{ gr}} \right)$$

$$VC = (3.4233 \times 10^{-11} \frac{cm}{s}) \left( \frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}} \right) \left( \frac{86,400 \text{ s}}{1 \text{ día}} \right) \left( \frac{365 \text{ días}}{1 \text{ año}} \right)$$

$$VC = 0.0105708 \left[ \frac{mm}{año} \right]$$

Ahora se obtendrá la velocidad de corrosión en mili pulgadas por año [mpy]

$$VC = (0.0105708 \left[ \frac{mm}{año} \right]) \left( \frac{1 \text{ in}}{25.4 \text{ mm}} \right) \left( \frac{10^3 \text{ mils}}{1 \text{ in}} \right)$$



$$VC = 0.41617 \text{ [mpy]}$$

La Tabla (3.5.1.1) muestra los resultados de la velocidad de corrosión del acero decapado, tanto en mm/año como en mili pulgadas por año (mpy).

Día	mm/año	mpy
1	0.01079	0.416
3	0.01795	0.707
4	0.00942	0.371
7	0.00974	0.384
8	0.01309	0.516
9	0.01081	0.426
10	0.00854	0.337
11	0.01097	0.433
14	0.01020	0.402
15	0.01022	0.403
16	0.01305	0.515
17	0.02959	1.167
21	0.01713	0.676
22	0.01612	0.636
23	0.01317	0.520
24	0.00869	0.343
28	0.00936	0.370

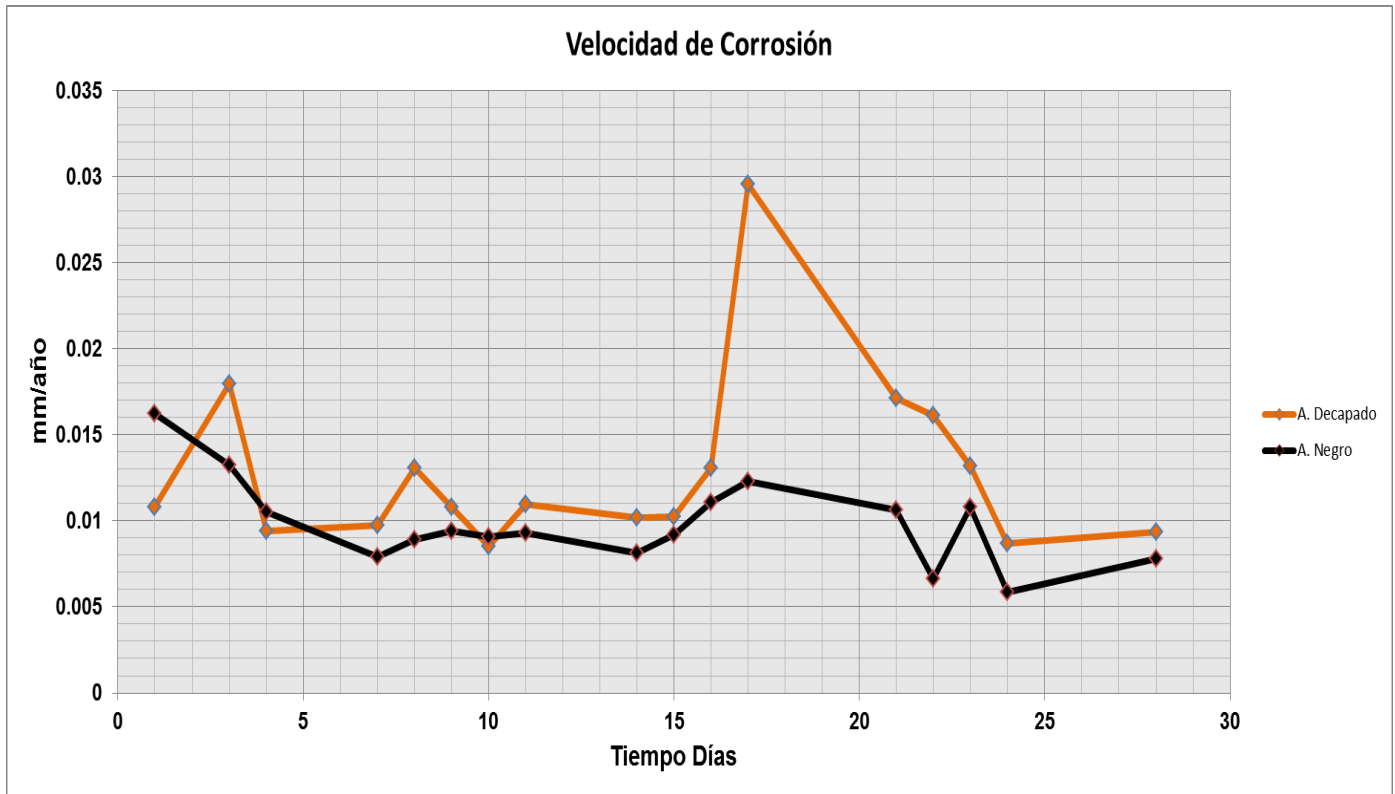
**Tabla (3.5.1.1): Velocidad de corrosión del acero decapado.**

En la tabla (3.5.1.2) se muestran los resultados de la velocidad de corrosión del acero negro tanto en mm/año como en mpy.

<b>Día</b>	<b>mm/año</b>	<b>mpy</b>
<b>1</b>	0.016263	0.640
<b>3</b>	0.013246	0.521
<b>4</b>	0.010510	0.413
<b>7</b>	0.007912	0.311
<b>8</b>	0.008925	0.351
<b>9</b>	0.009435	0.371
<b>10</b>	0.009108	0.358
<b>11</b>	0.009326	0.367
<b>14</b>	0.008123	0.320
<b>15</b>	0.009183	0.362
<b>16</b>	0.011061	0.436
<b>17</b>	0.012310	0.485
<b>21</b>	0.010664	0.420
<b>22</b>	0.006639	0.261
<b>23</b>	0.010801	0.426
<b>24</b>	0.005883	0.232
<b>28</b>	0.007800	0.307

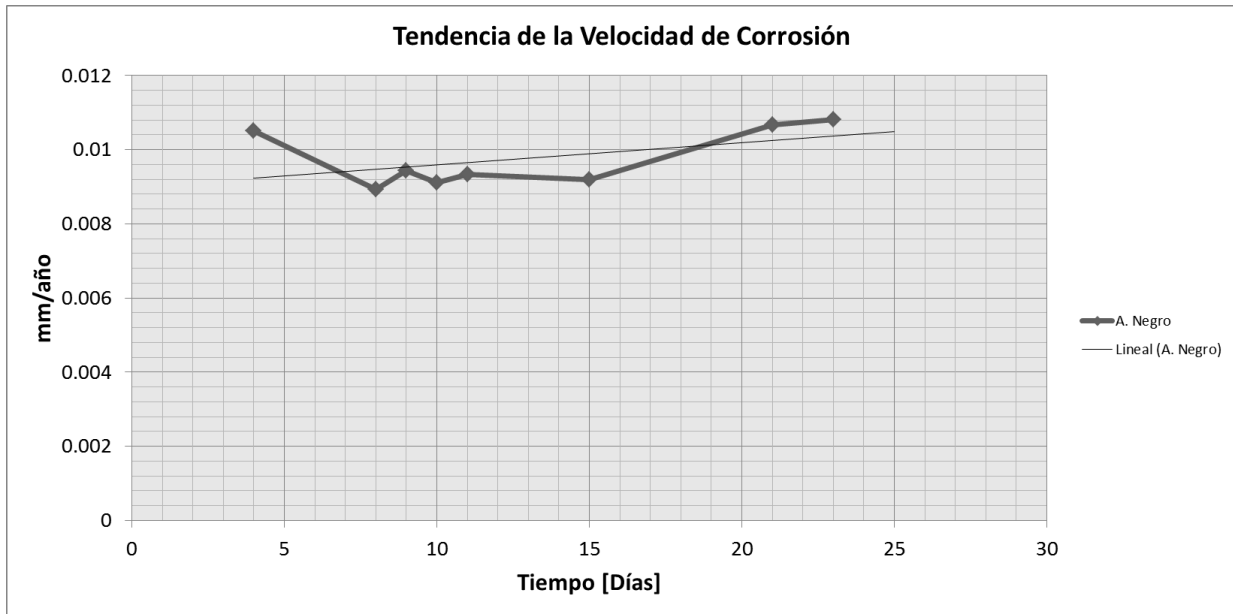
**Tabla (3.5.1.2): Velocidad de corrosión del acero negro.**

En la Figura (3.5.1.3) se muestra un gráfico con la velocidad de corrosión de ambos aceros en los 28 días de registro en [mm/año] con lo cual se aprecia que la velocidad de corrosión en el acero decapado es ligeramente mayor a la obtenida en el acero negro.



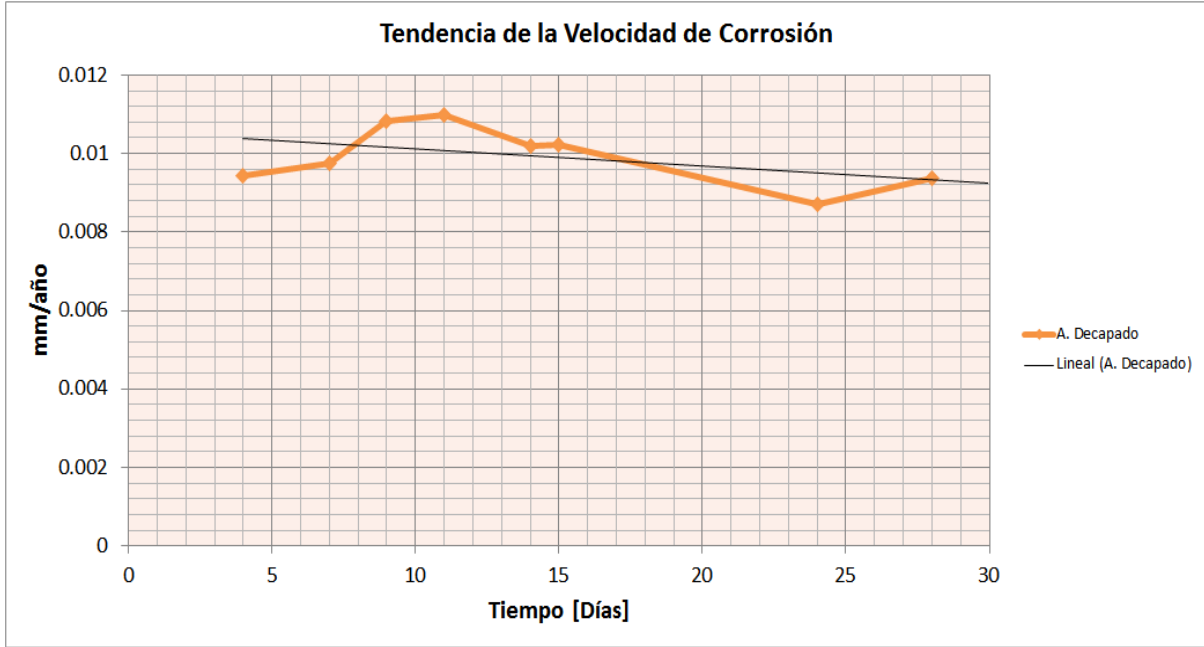
**Figura (3.5.1.3): Gráfica de comparación de la velocidad de corrosión en [mm/año]**

La figura (3.5.1.4) se aprecia la tendencia de los valores que adquirió la velocidad de corrosión en el acero decapado.



**Figura (3.5.1.4): Tendencia de valores para la velocidad de corrosión del acero decapado [mm/año].**

En la figura (3.5.1.5) está la tendencia de la velocidad de corrosión del acero negro.



**Figura (3.5.1.5): Tendencia de valores para la velocidad de corrosión del acero negro [mm/año].**

Esta parte de la velocidad de corrosión es muy importante para esta tesis debido a que con esto podemos evaluar la vida útil de un acero de refuerzo y sobre todo comparar los efectos que se ocasionan al tener diferentes acabados superficiales en el acero de refuerzo. Revisando los datos se puede apreciar que el acero negro presenta una mejor resistencia a la corrosión en comparación al acero decapado.

Revisando las gráficas de la tendencia en la velocidad de corrosión se obtiene que hay una pérdida de espesor de 0.01 mm/año, en un año esta fracción no causaría mucha inquietud pero como la vida útil de algunas estructuras es de 80 años o más y considerando también que existe el riesgo que la estructura sufra carbonatación, podemos decir que la vida útil de la estructura se reducirá drásticamente o se tendrán que realizar métodos preventivos, que no se tenían considerados.

### 3.5.2.- Velocidad de corrosión del acero galvanizado

VC = Velocidad de corrosión.

Equivalente gramo de Zn = 32.7 [gr]

$I_{corr} = 20.88 \times 10^{-6}$  [A/cm<sup>2</sup>]

$$\frac{1 \text{ Ampere}}{\text{cm}^2} = \frac{\text{coulombio}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} = \frac{1}{96500} = \frac{\text{Equiv. gr de Fe}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

$$VC = (20.88 \times 10^{-6}) \left( \frac{1}{96500} \right) (32.7)$$

$$VC = 7.0754 \times 10^{-9} \left[ \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

La Densidad del Zn = 7.14 [gr/cm<sup>3</sup>]

$$VC = (7.0754 \times 10^{-9} \left[ \frac{\text{gr}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right]) \left( \frac{1 \text{ cm}^3}{7.14 \text{ gr}} \right)$$

$$VC = (9.909 \times 10^{-10} \frac{cm}{s}) (\frac{10 mm}{1 cm}) (\frac{86,400 s}{1 día}) (\frac{365 días}{1 año})$$

$$VC = 0.3125 [\frac{mm}{año}]$$

Ahora se obtendrá la velocidad de corrosión en mili pulgadas por año [mpy]

$$VC = (0.3125 [\frac{mm}{año}]) (\frac{1 in}{25.4 mm}) (\frac{10^3 mils}{1 in})$$

$$VC = 12.304 [mpy]$$

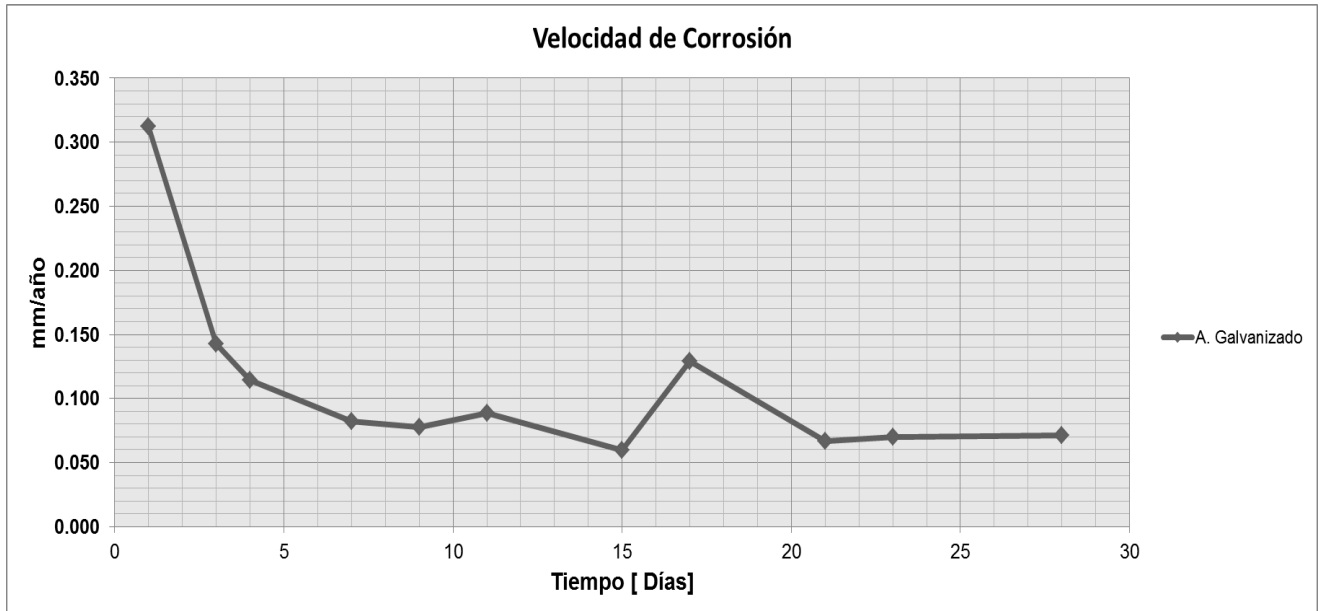
En la tabla (3.5.2.1) se tienen los resultados calculados de la velocidad de corrosión para todo el monitoreo del acero galvanizado.

Día	mm/año	mpy
1	0.312	12.304
3	0.14	5.604
4	0.114	4.498
7	0.082	3.240
9	0.078	3.067
11	0.088	3.476
15	0.060	2.355
17	0.129	5.094
21	0.067	2.636
23	0.070	2.767
28	0.071	2.800

**Tabla (3.5.2.1): Velocidad de corrosión del acero galvanizado**

En la Figura (3.5.2.2) se muestra la gráfica de la velocidad de corrosión del acero galvanizado por inmersión en caliente, en la cual se aprecia que la velocidad de corrosión es mucho mayor que en los otros dos aceros (acero negro y decapado), ésta velocidad de corrosión alta es debida al recubrimiento de zinc el cual fue

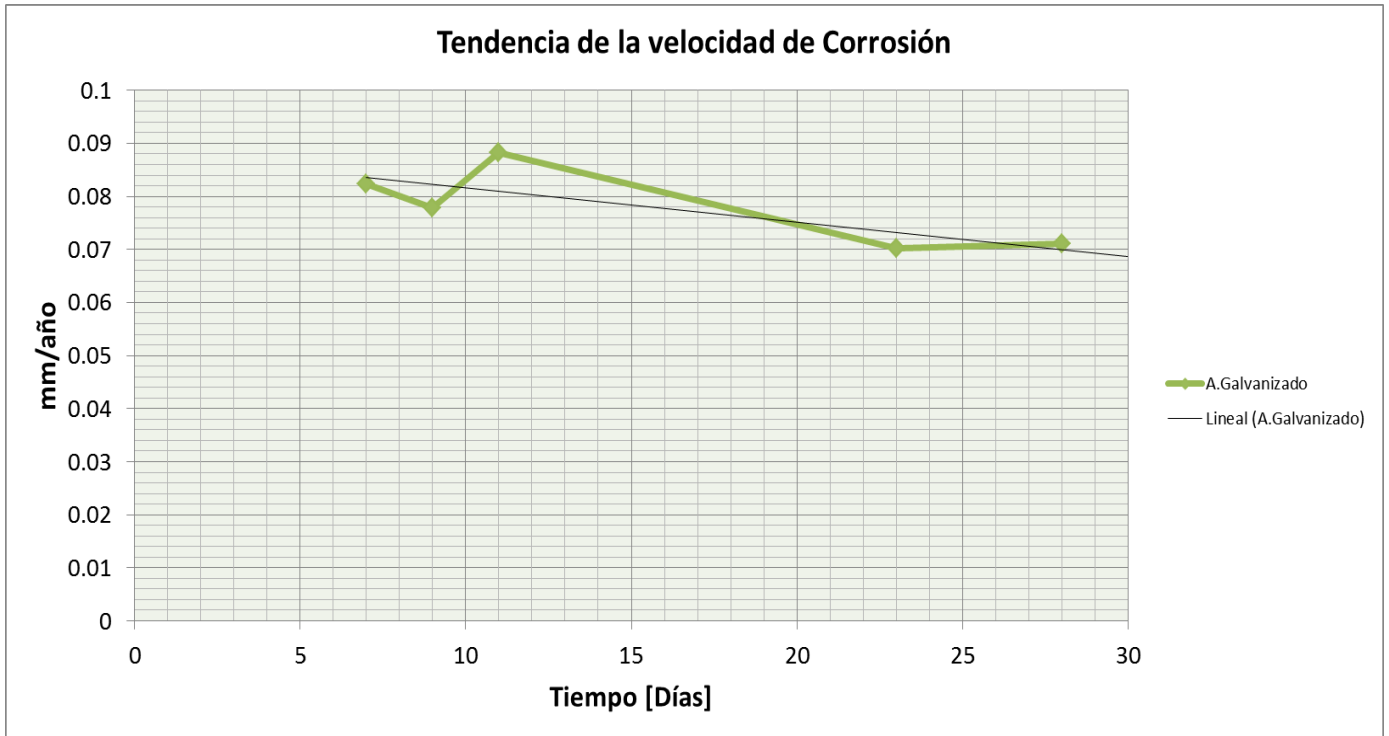
diseñado para que se oxidará, cabe mencionar que el acero base del acero galvanizado no sufre de ningún tipo de corrosión.



**Figura (3.5.2.2): Gráfica de la velocidad de corrosión en [mm/año]. Acero galvanizado**

En la figura anterior se mostró el comportamiento de la velocidad de corrosión en el acero galvanizado, se observa que empieza en valores muy altos, pero en el transcurso del monitoreo los valores de velocidad de corrosión disminuyen, ésta disminución en la velocidad de corrosión puede ser debida a la formación de óxidos de zinc en la superficie del acero galvanizado.

En la figura (3.5.2.3) se tiene la tendencia de la velocidad de corrosión, esto es para manejar un promedio de la velocidad de corrosión que sufrió el acero galvanizado durante los 28 días del monitoreo.



**Figura (3.5.2.3): Tendencia de valores para la velocidad de corrosión, en [mm/año].**

La tendencia del acero galvanizado está en valores de 0.08 y 0.07 [mm/año] de espesor, si estos valores se mantienen durante la vida útil del acero galvanizado, el recubrimiento de zinc en el acero solamente tendría una vida útil de 2 años y 2 meses, debido a que el espesor que se tiene en las varillas de acero galvanizado es de 182.788 [μm], pero no podemos afirmar esto debido a que se necesita hacer un monitoreo con mayor tiempo de exposición del acero galvanizado y ver la evolución en el comportamiento de los óxidos de zinc que empiezan a recubrir a la varilla galvanizada.



### **3.6.- Solución poro.**

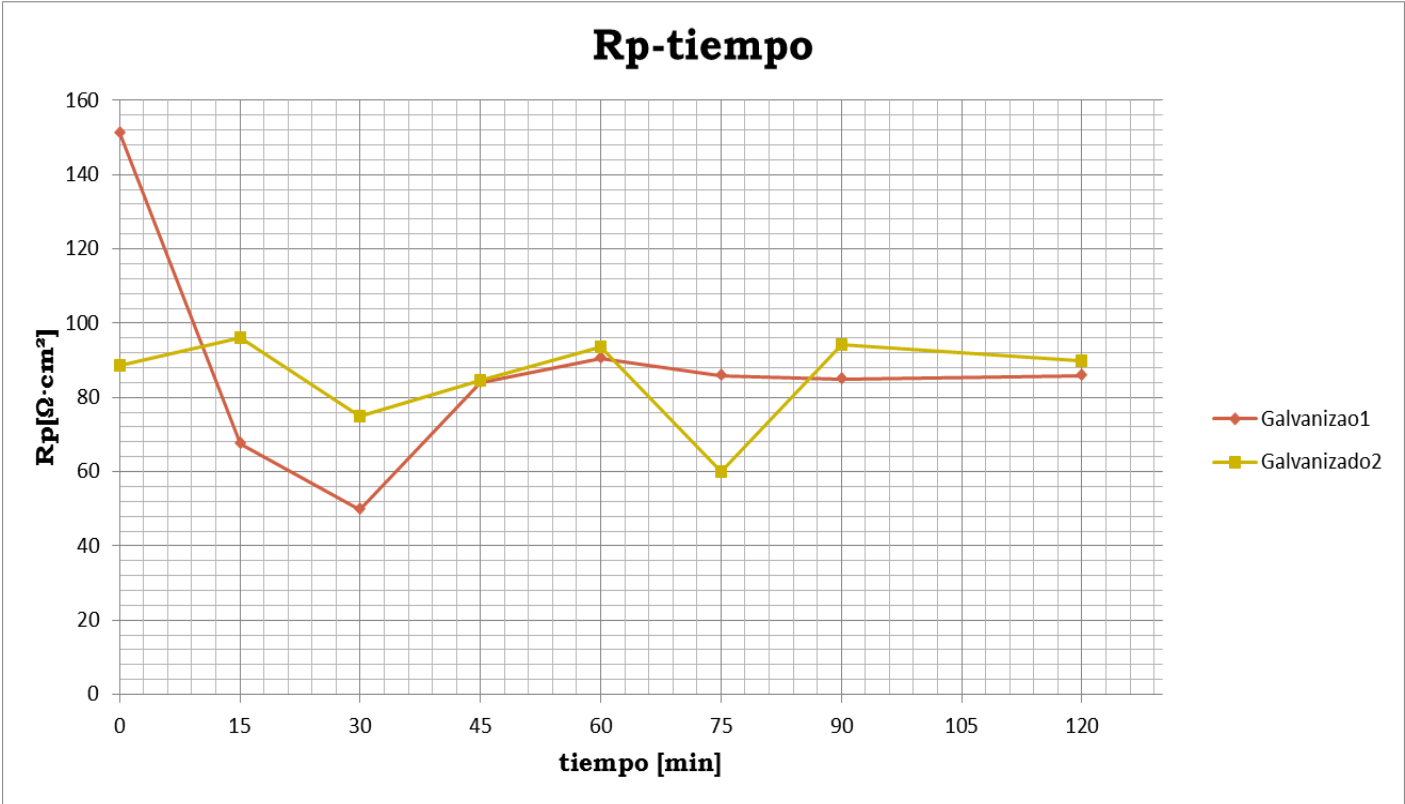
#### **3.6.1.- Resistencia a la polarización ( $R_p$ ) en solución poro de $[\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$ al 3%] en el acero galvanizado por inmersión en caliente.**

Los resultados que se muestran fueron obtenidos en el laboratorio con el método electroquímico de  $R_p$  ya descrito, la solución empleada fue elaborada con agua destilada y  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en polvo, la solución está saturada de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en polvo y se agregó el 3% de  $\text{NaCl}$  en peso por litro de agua a la solución, esto último fue para simular un ambiente marino y manteniendo un pH de 12.5 a 13.

En la figura (3.6.1.1) muestro los resultados que obtuve en las pruebas de  $R_p$  del acero galvanizado en un tiempo de 2 horas de inmersión en la solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$  al 3% con un registro cada 15 min, lo cual se realizó por duplicado por lo tanto se tiene el acero galvanizado 1 y 2.

Como se puede apreciar en la figura (3.6.1.1) se tienen valores de  $R_p$  muy bajos lo que se traduce en magnitudes de densidad de corriente altas por lo cual se tendrán velocidades de corrosión muy severas.

En la figura (3.6.1.1) empieza a existir una tendencia cuasi constante en el valor de  $R_p$  igual a  $90[\Omega \cdot \text{cm}^2]$ .



**Figura (3.6.1.1): Gráfica de Rp del acero galvanizado en solución de  $[Ca(OH)_2 + NaCl]$  al 3%**

### 3.6.2.- Potencial de corrosión en solución poro de [Ca (OH)<sub>2</sub> + NaCl al 3%] del acero galvanizado.

Los resultados del potencial de corrosión que obtuve fueron realizados en el laboratorio de corrosión con el equipo potenciostatico Gill AC por duplicado por lo cual se tienen las dos líneas, se ocupo una celda de polímero, electrodo de referencia de calomel saturado y un electrodo auxiliar de grafito. Los resultados del potencial de corrosión se muestran en la figura (3.6.2.1) los cuales corresponden a la solución poro de Ca(OH)<sub>2</sub> + NaCl al 3%, en un tiempo de 1 hora de inmersión por cada evento.

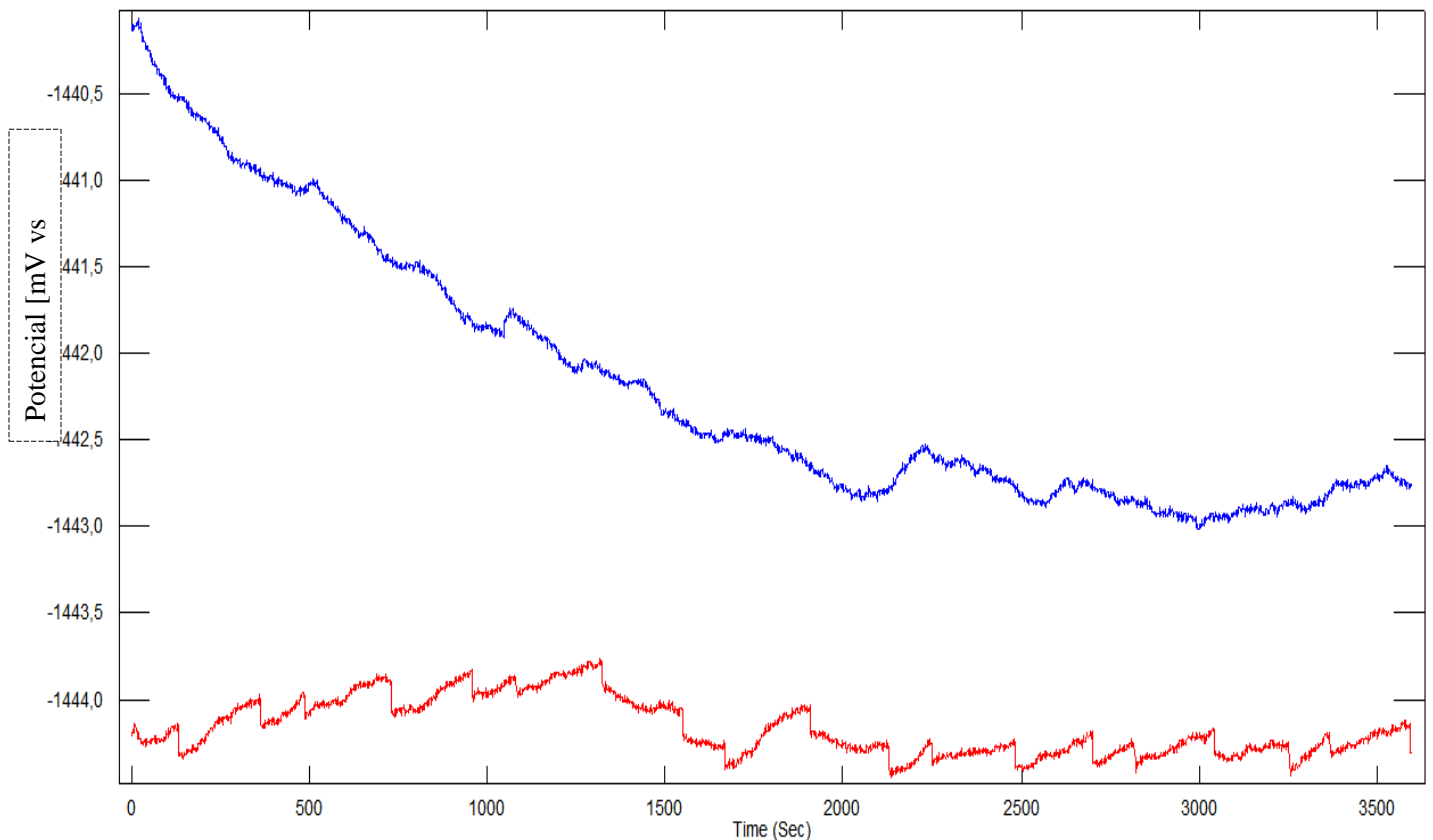
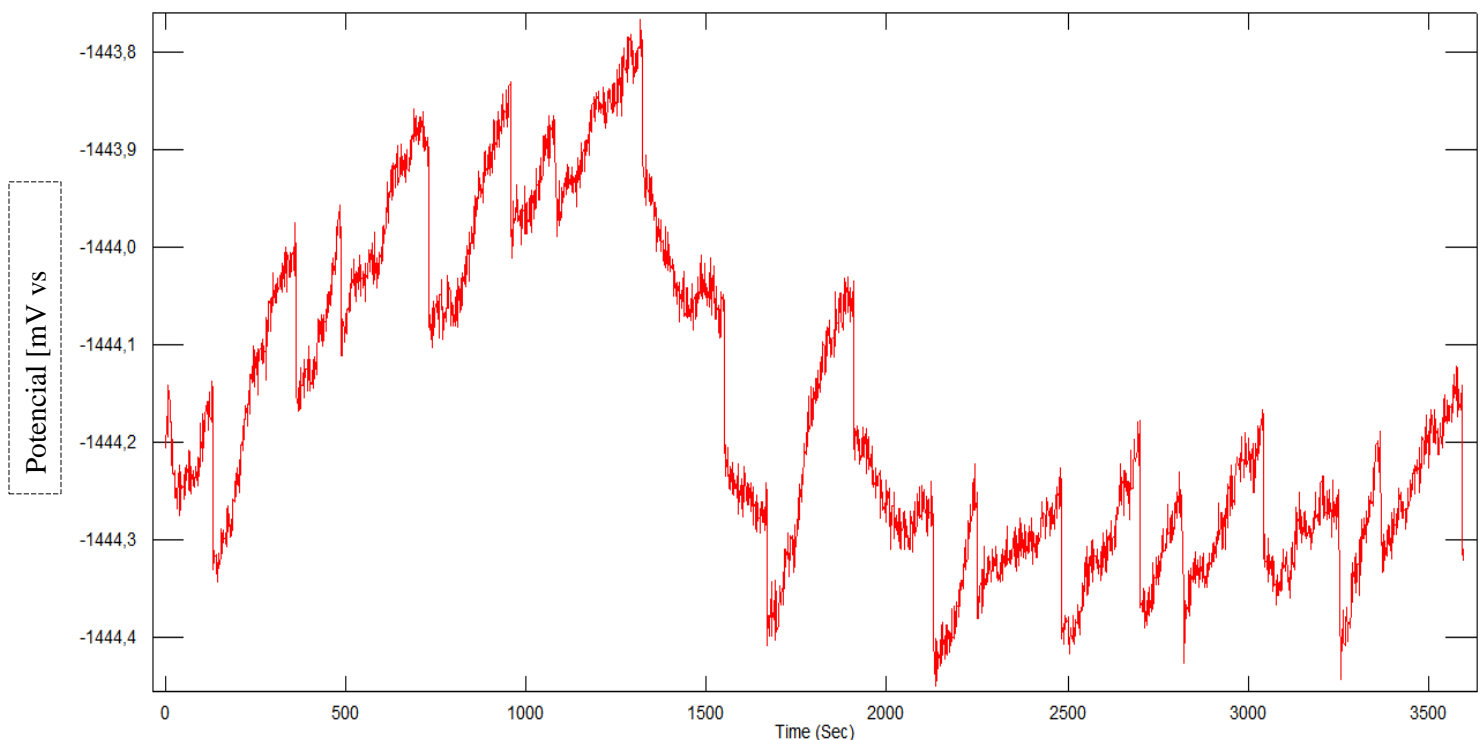


Figura (3.6.2.1). Gráfica del potencial de corrosión del acero galvanizado en solución poro de Ca (OH)<sub>2</sub> + NaCl al 3%.

La figura (3.6.2.1) se muestra como el zinc es altamente activo en la solución poro empleada, llegando a alcanzar un potencial de corrosión de  $-1444.4$  [mV] éste potencial tan negativo indica una interacción muy alta entre los cloruros y el zinc.

En la figura (3.6.2.1) se aprecia que existe una gran coincidencia en el rango de valores entre la gráfica azul y la roja las cuales pertenecen a dos probetas diferentes de acero galvanizado pero sin embargo, solo existe una variación de  $3.5$  [mV] entre ambas gráficas.

En la Figura (3.6.2.2) presento por separado el comportamiento del potencial de corrosión del acero galvanizado de la línea roja de la figura (3.6.2.1).



**Figura (3.6.2.2). Gráfico del potencial de corrosión del acero galvanizado en solución poro de  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$  al 3%.**

En la figura (3.6.2.2) se tiene un potencial de corrosión inicial de  $-1444.2$  [mV], el cual presenta variaciones muy pequeñas durante el tiempo de registro, lo cual hace que el potencial de corrosión se vea cuasi lineal en la figura (3.6.2.1).

### 3.6.3.- Velocidad de corrosión del acero galvanizado en solución poro de [Ca (OH)<sub>2</sub> + NaCl al 3%]

Los resultados de la velocidad de corrosión que se presentan fueron obtenidos por un tiempo de 2 horas de inmersión del acero galvanizado en la solución poro.

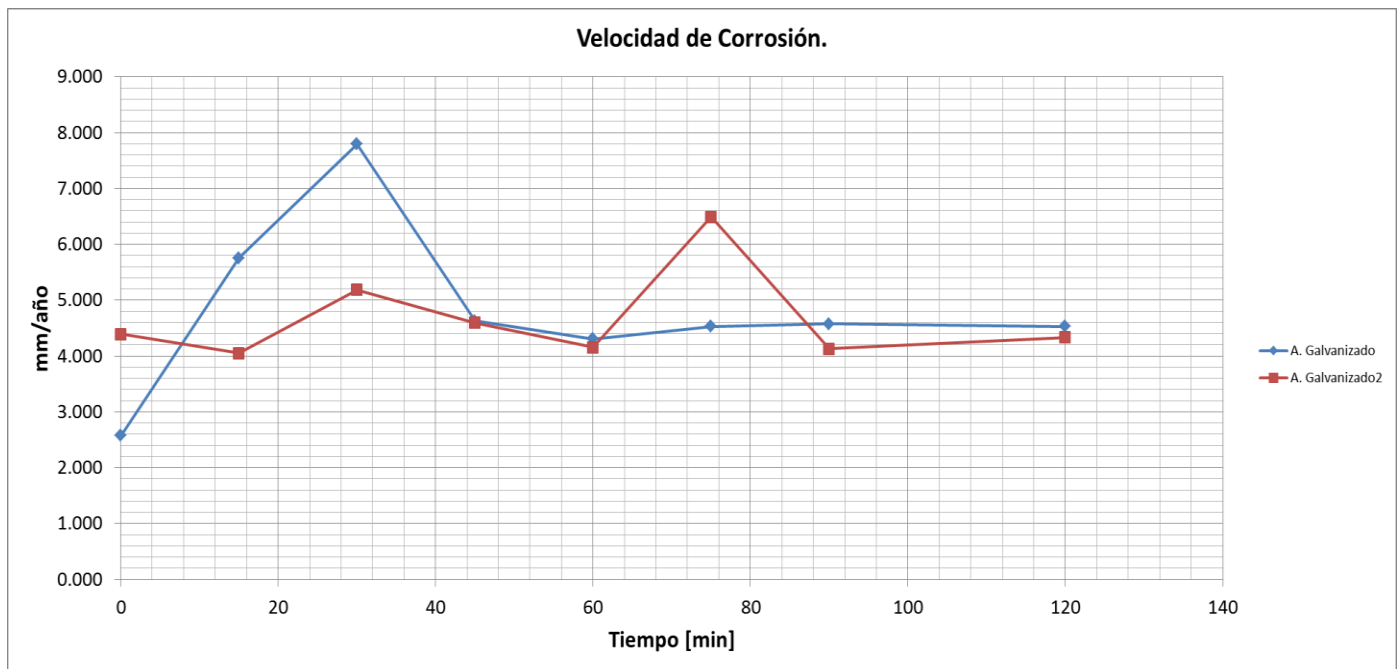
En la tabla (3.6.3.1) se presentan los resultados de la velocidad de corrosión los cuales se obtienen apartir de los datos de Rp e I<sub>corr.</sub> del el acero galvanizado durante un tiempo de registro de 2 horas, los resultados se presentan en [mm/año] y [mpy] (milipulgadas por año) y por duplicado.

Tiempo [min.]	mm/año	mpy
0	2.58	101.40
15	5.75	226.50
30	7.80	306.90
45	4.63	182.21
60	4.31	169.52
75	4.53	178.26
90	4.58	180.24
120	4.53	178.26

Tiempo [min.]	mm/año	mpy
0	4.39	172.90
15	4.05	159.36
30	5.19	204.21
45	4.59	180.80
60	4.16	163.59
75	6.49	255.55
90	4.13	162.47
120	4.33	170.65

**Figura (3.6.3.1). Resultados de la velocidad de corrosión del acero galvanizado en solución poro de Ca(OH)<sub>2</sub> + NaCl al 3%.**

En la figura (3.6.3.2) se muestran los gráficos de la velocidad de corrosión que se tiene en la solución poro, los resultados los muestro en mm/año y mpy.



**Figura (3.6.3.2). Gráfico de la velocidad de corrosión del acero galvanizado en solución poro de  $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{NaCl}$  al 3%.**

En el gráfico anterior se tiene que, desde el comienzo de la prueba, el acero galvanizado presenta una alta velocidad de corrosión lo cual está respaldado con los valores del potencial de corrosión que se alcanzaron anteriormente, los cuales eran muy activos del orden de  $-1.4$  [volts], estos valores tan altos en la velocidad de corrosión pueden deberse a los cloruros presentes en la solución, los cuales no permiten que existan productos de corrosión estables, en este caso óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ), el óxido de zinc actúa como una capa pasiva en la superficie de la varilla galvanizada con lo cual la velocidad de corrosión disminuye.

En ambientes marinos, se encuentran, comunmente, el hidroxicloruro de zinc  $\text{Zn}_5(\text{OH})_8\text{Cl}_2\text{H}_2\text{O}$  y el hidroxiclorsulfato de zinc y sodio.

## Conclusiones

- » Durante los 28 días de curado del cemento, se apreció que las probetas de acero galvanizado por inmersión en caliente presentan una mayor tendencia a la corrosión, sin embargo cabe aclarar que la corrosión que se presenta en las probetas de acero galvanizado se lleva a cabo solo en el recubrimiento de zinc.
- » En las probetas de acero negro la corrosión que se presentó fue ligeramente menor en comparación a la del acero decapado ya que la capa de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) tiene un efecto barrera frente al medio agresivo.
- » La mayor velocidad de corrosión se presentó en el acero galvanizado, sin embargo al trascurso de los días del monitoreo la velocidad de corrosión disminuye y esto se puede comprobar debido a que los valores de  $R_p$  aumentan durante los 28 días que se llevó a cabo el monitoreo.
- » Es muy difícil calcular la vida útil del acero de refuerzo embebido en cemento debido a que se necesitan realizar más pruebas electroquímicas, las cuales nos den datos precisos de la morfología de corrosión que se está llevando en el metal y también un mayor tiempo de exposición del metal, y así poder identificar los productos de corrosión.
- » Los datos obtenidos de  $R_p$  y potencial de corrosión del acero galvanizado por inmersión en caliente en solución poro son muy controversiales debido a que solo existe una simulación química de lo que se tendría si estas probetas de acero galvanizado estuviesen embebidas en concreto teniendo penetración de cloruros. Además, como se tenía una celda electroquímica abierta no se tomó en cuenta la penetración del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) del ambiente en la solución, el  $\text{CO}_2$  juega un papel importante en la pérdida de alcalinidad en el hormigón armado dando como resultados velocidades de corrosión elevadas.
- » Los valores de  $R_p$  en la solución poro son muy bajos y esto es debido a los cloruros presentes en la solución además de que de acuerdo al diagrama de Pourbaix la zona donde está el  $E_{\text{corr}}$  del zinc y el pH de la solución es una zona de corrosión.
- » Al realizar una comparación entre los datos de  $R_p$  de las probetas embebidas en cemento y los datos de  $R_p$  de la solución poro se establece que, el recubrimiento de zinc sufrirá una mayor oxidación en la solución poro del orden de 11 veces mayor a la oxidación presente en la pasta de cemento.

- » Con los datos obtenidos de la velocidad de corrosión y los datos de espesor del acero galvanizado, se puede calcular la vida útil que tendrá el recubrimiento de zinc el cual con la velocidad de corrosión de 0.07 [mm/año], este espesor tendría una vida útil de 2.6 años, claro está considerando una corrosión que trabaje en un sistema estable y que no se formen productos de corrosión que disminuyan los mecanismos de corrosión.



## Referencias

1. ASM Metals Handbook, Volume 13A, Corrosion: Fundamentals, Testing and Protection, 9th Edition.
2. ASM Metals Handbook, Volume 13, Corrosion, 9th Edition.
3. Moreno Fernández, Esther (2008) "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón: estudio experimental de la variación de la ductilidad en armaduras corroídas aplicadas, aplicando el criterio de acero equivalente." Directores: Dr. Manuel Fernández Cánovas, Dr. Alfonso Cobo Escamilla. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Ciencias e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química, Leganés.
4. Bermúdez Odriozola, Miguel Ángel (2007) "Corrosión de las armaduras del hormigón armado en ambiente marino: zona de carreras de mareas y zona sumergida." Directora: Ma. Pilar Alejaos Gutiérrez. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de ingenieros de caminos, canales y puentes. Madrid.
5. Sánchez de Rojas, Noguera (2004) "Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado: estudio de diferentes variables que influyen en la eficiencia del tratamiento. Directores: Dr. Miguel Ángel Climent Llorca, Dr. Pedro Garcés Terradillos. Tesis Doctoral. Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería de la construcción de la escuela politécnica superior de alicante. Alicante.
6. Garcés Terradillos, Pedro. Climent Llorca, Miguel Ángel. Zornoza Gómez, Emilio (2008) "Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado". Cottolengo. 25- San Vicente (Alicante) Editorial Club Universitario, P.126
7. Gonzales Fernández, José A. (1984) "Teoría y práctica de la lucha contra la corrosión". Consejo superior de investigaciones científicas. Madrid, GRAFIMAD S.A. P.683.
8. Andrade, Carmen. Feliú, Sebastián (1991) "Corrosión y protección metálicas, Volumen 1 Nuevas Tendencias". Consejo Superior de Investigaciones Científicas" (España). P. 261.
9. Montani, Rick (Diciembre 2000) Instituto Mexicano del cemento y del concreto, A.C. Revista Construcción y tecnología,. La carbonatación, enemigo olvidado del concreto. Disponible en web: <<http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>>. [Consulta: 28/08/12].
10. ASTM International. A 239-95 (Reapproved 1999).
11. ASTM International. G 59- 97 (Reapproved 2002).
12. B.B Damaskín, O. A. Petrí.(1981) "Fundamentos de la electroquímica teórica". Traducido del ruso por Laura García Rodríguez. MIR Moscú. P140.

13. Rondón S.M. Carlos (2005) "Manual de Armaduras de Refuerzo para Hormigón: Fabricación-Instalación-Protección. 1ª Edición. M y M Servicios gráficos S.A. P 286.
14. Asociación técnica española de galvanización (ATEG). "Prontuario del acero galvanizado"
15. Genescá Llongueras, Juan (2002) "Técnicas Electroquímicas para el control y estudio de la corrosión. Primera Jornada sobre técnicas electroquímicas para el control y estudio de la corrosión XVI congreso Sociedad Mexicana Electroquímica, Querétaro 23 Mayo 2002.Facultad de Química UNAM. P 271.
16. Hebert H. Uhlig. (1979) "Corrosión y Control de la Corrosión". Traducido por Eduardo Aguilar. URMO, S.A. de Ediciones. Espartero, 10. Bilbao. P393.
17. Denny A. Jones. (1995) "Principies and Prevention of Corrosion". Second Edition. Prentice Hall. P.572.
18. Ulik R. Evans. (1986) "Corrosiones Metálicas". Traductor José Company Bueno. Editorial Reverté S.A. P.319.
19. Javier Ávila, Joan Genescá.(1995) "Más Allá de la Herrumbre II. La lucha contra la corrosión". La ciencia para todos /79. P. 157.
20. Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff. (2004) "Diseño y control de Mezclas de concreto". 1ª Edición PCA (Portland Cement Association).
21. Castillo Talavera Ángel, (2005) "Modelado del efecto de las acciones climáticas en la cantidad de agua en estado líquido del hormigón para la estimación de la corrosión de la armadura" Directores: Dra. Ma. Carmen Andrade, Dr. Eduardo Martínez .Tesis Doctoral universidad politécnica de Madrid.
22. Marder, A.R. (2000), "The metallurgy of zinc-coated steel" Progress in Materials Science 45. Department of Materials Science and Engineering, Lehigh University, Bethlehem, PA, 18015-3195, USA. Pp.191-271.

## Anexos

### Cementos

El cemento está formado por la molienda del producto resultante de la cocción en hornos rotatorios a 1450°C de una mezcla de calizas, arcilla, sílice y óxidos de hierro, que recibe el nombre de clínker. Al clínker enfriado y molido, se le añade yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Sulfato de Calcio Hidratado) resultando el producto comercial denominado cemento Pórtland. En la siguiente tabla se muestran los 4 compuestos principales en el cemento portland que totalizan el 90% o más del peso del cemento portland.

Denominación	Compuesto	% en Peso
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	20-30
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{Si}_2$	45-60
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	4- 12
Ferritoaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	10-20

Como componentes secundarios se encuentran  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  y  $\text{SO}_3$ . Cuando se mezcla el cemento con agua, los silicatos y aluminatos se hidratan dando lugar a una masa rígida conocida como cemento endurecido, a este proceso se le denomina fraguado.

Se puede considerar la hidratación del cemento como un proceso en el cual se produce una disolución con reacción de sus componentes con el agua, seguida de una difusión y precipitación de los componentes hidratados. La hidratación continúa produciéndose después del fraguado. A este tratamiento se le llama curado. Durante el curado va aumentando progresivamente la resistencia mecánica del hormigón al ir precipitando sus componentes hidratados.

La hidratación separada de cada componente del cemento ocurre de la siguiente manera:

**Silicato tricálcico o alita:** reacciona rápidamente con el agua produciendo silicatos cálcicos hidratados  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  y portlandita CH:

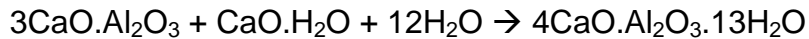


Estos silicatos cálcicos hidratados tienen carácter coloidal y se les conoce también como gel CSH.

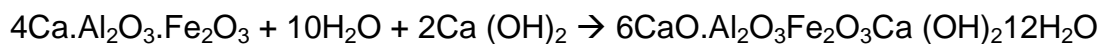
**Silicato bicálcico o belita:**



**Aluminato tricálcico o felita:** Forma aluminatos cálcicos cristalinos, algunos son estables (los que cristalizan en el sistema cúbico) y otros meta estables (hexagonales). Este componente libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento.



**Ferritoaluminato tetracálcico o Celita:** Produce aluminatos cálcicos y ferritos cálcicos:



El ferroaluminato tetracálcico es el producto resultante del uso de las materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización (cocción) durante la fabricación del cemento. Este compuesto contribuye muy poco para la resistencia del cemento.

Además del cemento portland descrito anteriormente existen otros tipos de cementos. Todos ellos, excepto el cemento de aluminato de calcio, consisten en modificaciones del cemento Portland.

Estos son algunos tipos de cementos existentes:

**Cemento puzolánicos:** Proviene de la mezcla de clinker de cemento Portland y puzolanas, que son materiales de naturaleza silíceo o aluminosa, el cual mejora la resistencia química frente a determinados agentes agresivos.

**CPEG-** cemento portland con escoria de alto horno, el cual tiene del 6% al 60% de escoria;

**CPC-** cemento portland compuesto, se compone de clinker, yeso y dos o más adiciones. Las adiciones pueden componer del 6% al 35% de escoria, del 6% al 35% de material puzolánico, del 1% al 10% de humo de sílice y del 6% al 35% de caliza. Independientemente del tipo y cantidad de material adicionado, la cantidad de clinker e yeso debe ser del 50% al 94%.

**CPS-** cemento portland con humo de sílice, que recibe del 1% al 10% de humo de sílice.

**Cemento blanco-** Consiste en cemento portland con bajo contenido en óxido férrico. Este es el responsable de la coloración del cemento, por lo que con su ausencia se consiguen cementos de color blanco. La preparación de estos

cementos requiere mayor temperatura durante la cocción, ya que el óxido férrico actúa como fundente. Los cementos mexicanos se especifican según la norma NMX-C-414-ONNCCE.

Los cementos mexicanos también pueden dividirse de acuerdo a su resistencia a la compresión mínima a los 28 días. Los cuales van de 20[MPa] ,30[MPa] y 40[MPa] respectivamente. Existen dos clases más de resistencia las cuales son 30R y 40R que además de representar resistencia a los 28 días de 30 y 40 [MPa] respectivamente, también deben de presentar resistencia a la compresión a los 3 días de 20 [MPa] y 30[MPa]. El tiempo mínimo de fraguado inicial de todas las clases es 45 minutos.