



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la

Producción

“Obtención de Curvas Galvanostáticas y Ensayos de Resistencia
a la Polarización en Varillas de Construcción ASTM A42 en
Solución de Agua al 3,5% de Cloruro de Sodio”

PROYECTO DE GRADO

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Daniel Estuardo Corte Morquecho

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2010

A G R A D E C I M I E N T O

Agradezco a Dios por su bendición y voluntad por haber podido alcanzar esta meta, a mis padres por su esfuerzo, apoyo y confianza, a mi hermano quien es la razón de superación y en especial al Ing. Julián Peña Estrella, Director de este Informe de Proyecto de Grado por su invaluable ayuda prestada a la realización de la misma.

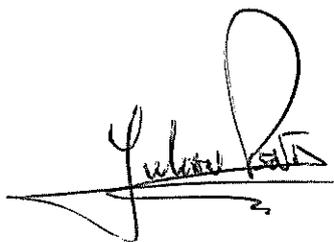
DEDICATORIA

Dedico este trabajo a las personas más especiales de mi vida, mis padres, Jorge Corte y María Morquecho, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente, a mis familiares y demás personas que creyeron en este servidor.

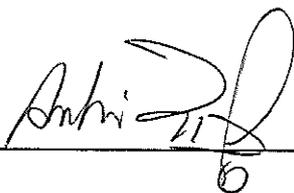
TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Ing. Francisco Andrade S.
DECANO DE LA FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Julián Peña E.
DIRECTOR DE PROYECTO

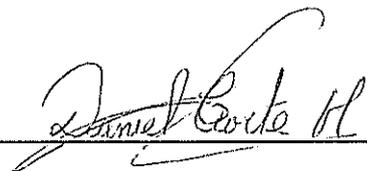


Ing. Andrés Rigail C.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Informe de Proyecto de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).



Daniel Estuardo Corte Morquecho

RESUMEN

El presente Informe de Proyecto de Grado describió el uso de una técnica llamada Resistencia de Polarización (R_p) o Polarización Lineal utilizada para determinar la Velocidad de Corrosión, tomando como base estándares internacionales que regulan este tipo de procedimiento experimental.

El objetivo de este trabajo fue el de obtener Curvas Galvanostáticas, mediante un equipo llamado Potencio/Galvanostato, que incluye una Celda de Polarización y un Software de Adquisición de Datos.

En el capítulo 1, se detalló el método por el cual se encontró la tasa de corrosión instantánea del metal a examinar, mediante la ecuación de Stern-Geary.

En el capítulo 2, se detalló el procedimiento experimental que se utilizó en los ensayos electroquímicos, los que están basados en las normas ASTM G5-94

(“Método de Prueba Estándar de Referencia para la toma de Mediciones Potenciostáticas y Potenciodinámicas de Polarización Anódica”) y ASTM G59-97 (“Método de Prueba estándar para la Realización de Mediciones Potenciodinámicas de Resistencia a la Polarización “). Las pruebas se realizaron sobre varillas de construcción ASTM A42 expuestas en medios salinos (3.5% NaCl).

En el capítulo 3, se obtuvieron Curvas Galvanostáticas, las que serán comparadas con otras curvas obtenidas en otros trabajos de graduación que realizan en diferentes hormigones como los Tipo II y Puzolánicos utilizando la misma técnica de polarización. Luego por lo cual se comprobó cuál de estos diseños de hormigón fué el más adecuado para estos servicios.

En el capítulo 4, se emitieron las conclusiones y recomendaciones necesarias que se generarán durante y al final del estudio en cuestión.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.....	3
1.1. Derivación de la Resistencia a la Polarización.....	4
1.2. Medición de Potenciales con Electrodo de Referencia.....	10
1.2.1. Características de selección del Electrodo.....	18

1.3. Curvas de Polarización.....	23
1.3.1. Curvas Galvanostáticas.....	23
1.3.2. Curvas Potenciostáticas.....	25

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA.....	27
2.1. Circuito Galvanostático.....	27
2.2. Diseño de la Celda de Polarización.....	29
2.3. Descripción del Procedimiento Experimental.....	35
2.4. Muestra a Ensayar.....	36
2.4.1. Acero estudiado.....	37
2.4.2. Preparación de la Muestra.....	39
2.5. Ensayos de corrosión.....	41
2.5.1. Medio Electrolítico Utilizado.....	41
2.5.2. Equipos Utilizados.....	41
2.5.3. Resultados Obtenidos.....	45

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	52
3.1. Determinar la Resistencia a la Polarización (R_p).....	58
3.2. Cálculo de la Velocidad de Corrosión.....	58

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	61
4.1. Conclusiones.....	61
4.2. Recomendaciones.....	62

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	Gráfico Hipotético de Resistencia a la Polarización.....5
Figura 1.2	Electrodo Normal de Hidrógeno.....12
Figura 1.3	Electrodo de Calomel Saturado.....14
Figura 1.4	Electrodo de Plata/Cloruro de Plata.....15
Figura 1.5	Electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre.....17
Figura 1.6	Curva de Polarización para un Buen Electrodo de Referencia (línea A) y un Pobre Electrodo de Referencia (línea B).....20
Figura 1.7	Celda Electroquímica con Potencial de Unión Líquida.....22
Figura 1.8	Curva de Polarización Galvanostática.....24
Figura 1.9	Curva de Polarización Potenciostática.....26
Figura 2.1	Circuito Esquemático para Mediciones Galvanostáticas.....28
Figura 2.2.	Diseño Celda de Polarización Electroquímica: (a) Modelo Comercial y (b) Modelo Alternativo.....30
Figura 2.3	Celda de Celda de Polarización Electroquímica.....31
Figura 2.4	Componentes de Electrodo de Trabajo.....33
Figura 2.5	Micro Estructura Óptica 200X del acero ASTM A42.....39

Figura 2.6	Probetas para Ensayos Electroquímicos.....	40
Figura 2.7	Potencio/Galvanostato EG&G Modelo 362.....	42
Figura 2.8	Celda de Polarización Electroquímica (Diseño Terminado)....	44
Figura 2.9	Elementos que conforman el Electrodo de Referencia de Calomel Saturado.....	46
Figura 2.10	Electrodo de referencia de Calomel Saturado (Diseño Terminado).....	47
Figura 2.11	Ensayo Electroquímico Realizado al Acero ASTM A42.....	48
Figura 2.12	Grafica E vs. i (Después de 1 hora de Inmersión).....	50
Figura 2.13	Grafica E vs. i (Después de 4 horas de Inmersión).....	51
Figura 3.1	Resistencia a la Polarización vs. Tiempo, para Probetas con Cemento Portland Sumergidas en una solución de 3,5% de NaCl.....	55
Figura 3.2	Resistencia a la Polarización vs. Tiempo, para Probetas con Cemento Puzolánico Sumergidas en una solución de 3,5% de NaCl.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Potenciales de Diversos Electrodo de Referencia Respecto del Electrodo Normal de Hidrogeno.....18
Tabla 2	Composición Química del Acero ASTM A42.....38
Tabla 3	Valores Promedio de Resistencia a la Polarización para Probetas con cemento Portland.....53
Tabla 4	Valores Promedio de Resistencia a la Polarización para Probetas con cemento Puzolanico.....54
Tabla 5	Resultados Obtenidos de Muestras Expuestas al Medio 3,5% NaCl.....59

SIMBOLOGÍA

a_i	Peso Atómico.
e^-	Electrón.
E	Potencial Eléctrico.
E_{corr}	Potencial de Corrosión.
E_T	Potencial Desconocido.
E_R	Potencial del Electrodo de Referencia.
E_{LJP}	Potencial de Unión Líquida Desconocida.
f_i	Fracción de Masa.
H_2	Molécula de Hidrógeno.
I	Corriente Eléctrica.
i	Densidad de Corriente.
$i_{\text{app,c}}$	Densidad de Corriente Catódica Aplicada.
i_a	Densidad de Corriente Anódica .
i_c	Densidad de Corriente Catódica.
i_{corr}	Densidad de Corrosión.
i_{crit}	Densidad de Corriente Crítica.
i_{int}	Corriente de Intercambio.
N_{EQ}	Número de Equivalente.

n_i	Intercambio de Electrones.
V_{corr}	Velocidad de Corrosión.
V	Voltio.
V_{enh}	Voltio del electrodo Normal de hidrógeno.
ΔE	Diferencia de Potencial.
Δi	Diferencia de Densidad de Corriente.
>>	Mucho mayor.
\emptyset	Diámetro.
Ω	Ohm.
#	Número.
%	Porcentaje.
Σ	Sumatoria
β_a	Constante de Tafel anódico.
β_c	Constante de Tafel catódico.
ε_a	Sobrepotencial Anódico.
ε_c	Sobrepotencial Catódico.

ABREVIATURAS

A	Amperio.
Ag/AgCl	Electrodo de Referencia de Plata/Cloruro de Plata
ASTM	American Society for Testing and Materials.
ASM	American Society of Metal
B	Constante de Proporcionalidad.
Cl ⁻	Ión Cloro
cm ²	Centímetros al Cuadrado.
Cu/CuSO ₄	Electrodo de Referencia de Cobre Sulfato de Cobre
D	Densidad.
EA	Electrodo Auxiliar.
ER	Electrodo de Referencia.
ET	Electrodo de Trabajo.
g	Gramos.
H ⁺	Ión Hidrógeno
HCl	Ácido Clorhídrico.
KCl	Cloruro de Potasio.
mpy	Mili-Pulgadas por Año.
ml	Mililitros.

mm	Milímetros.
mV	Milivoltio.
N	Normal.
NaCl	Cloruro de Sodio.
NACE	National Association of Corrosion Engineers.
PE	Peso Equivalente.
pH	Concentración de iones H^+ .
R_p	Resistencia a la Polarización.
SCE	Electrodo de Referencia de Calomel Saturado.

INTRODUCCIÓN

Este trabajo se trata en la obtención de la velocidad de corrosión del acero ASTM A42 en una solución de 3,5% de cloruro de sodio, utilizando una técnica de laboratorio denominada Resistencia a la Polarización o también llamada Polarización Lineal, con la que obtendremos una curva de polarización que relaciona el potencial y la densidad de corriente (E vs i), la misma se obtiene determinando la pendiente de la curva, para luego hacer uso de la ecuación de Stern-Geary para encontrar la densidad de corrosión.

Esta técnica es rápida, simple y relativamente económica. La misma consiste en medir el potencial del material a experimentar, sobre este se fija un rango de variación de potencial de 30 mV, luego se perturba el sistema por medio de impulsos de corriente que varían conjuntamente con el potencial aplicado.

Por otra parte se detalla la construcción de un electrodo de referencia de calomel saturado y el diseño de una celda de polarización electroquímica que servirán para el objetivo previsto.

Además se realizará un análisis del comportamiento del R_p obtenido en probetas de hormigón utilizando dos tipos de cemento tales como el portland y puzolánico, y se conocerá cuál de estos es un mejor diseño de hormigón.

CAPÍTULO 1

1. MÉTODO DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

En el presente capítulo se detalla el uso de la técnica resistencia a la polarización, se muestra además la derivación para la obtención de la velocidad de corrosión, también se resaltarán las ventajas y desventajas de la misma.

El método electroquímico que se utilizará es el denominado resistencia a la polarización o polarización lineal, este ha sido utilizado por años para determinar las velocidades de corrosión, generalmente se encuentra expresada en mili-pulgadas por año (mpy). Estas mediciones se las puede obtener rápidamente, normalmente podremos obtener resultados en menos de diez minutos.

Durante muchos años de investigación científicos observaron experimentalmente el grado de polarización en 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.

1.1. Derivación de la Resistencia a la Polarización.

El método de resistencia a la polarización puede ser derivada de la teoría del potencial mixto, las curvas experimentales de polarización pueden obtenerse de la siguiente ecuación:

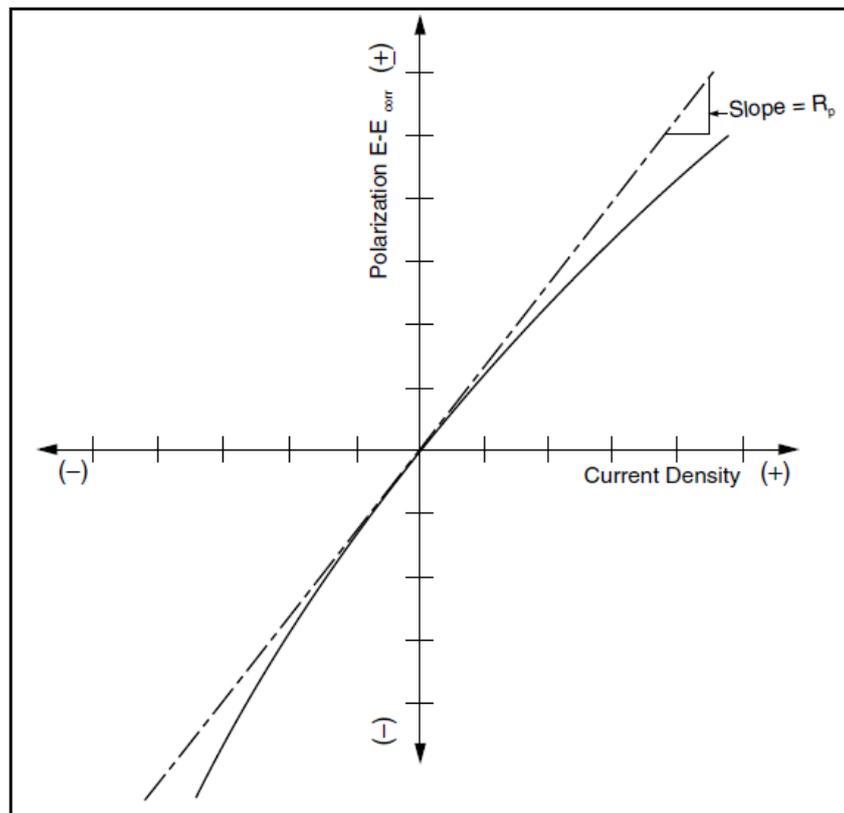
$$i_{app,c} = i_c - i_a \quad (1)$$

Donde i_c es la densidad de corriente para la reacción de reducción catódica, i_a es la densidad para la reacción de oxidación anódica, y $i_{app,c}$, es la densidad de corriente catódica aplicada, todas al mismo potencial E . De manera similar, la densidad de corriente anódica aplicada, $i_{app,a}$, viene dada por:

$$i_{app,a} = i_a - i_c \quad (2)$$

La curva de polarización graficada en la **Figura 1.1** muestra el aparente comportamiento lineal a una variación de voltaje cercano al origen. El alcance de la linealidad depende de las constantes de Tafel seleccionados.

La supuesta linealidad entre el potencial y la corriente en realidad no existe. Sin embargo es una aproximación bastante correcta y no implica errores en la técnica.



Fuente: Nace Corrosion Engineers' Reference Book,
3ª Edición, 2002

Figura 1.1 Gráfico Hipotético de Resistencia a la Polarización.

Al polarizar del potencial de corrosión, E_{corr} con las densidades de corriente anódica y catódica aplicada, i_c y i_a ,

$$\varepsilon_c = \beta_c \log \frac{i_c}{i_{corr}}, \quad (3)$$

y

$$\varepsilon_a = \beta_a \log \frac{i_a}{i_{corr}}, \quad (4)$$

Donde ε_c y ε_a son los sobrepotenciales, β_c y β_a son las constantes de Tafel anódica y catódica respectivamente, y i_{corr} es la velocidad de corrosión como la densidad de corriente. ε_c y ε_a son definidas como los sobrepotenciales porque representan cambios estables del potencial de corrosión E_{corr} .

Las constantes de Tafel anódica y catódica (β_a y β_c) son tomadas del **apéndice A**, con el siguiente valor de 0,3V/década.

Convirtiendo las ecuaciones (3) y (4) a una forma exponencial y sustituyendo en la ecuación (1), obtenemos.

$$i_{app,c} = i_{corr} (10^{-\varepsilon_c/\beta_c} - 10^{-\varepsilon_a/\beta_a}) \quad (5)$$

Así que $i_{app,c}$ es la diferencia entre dos funciones exponenciales las cuales aproximan a la linealidad con variación de voltaje ε , cuando $\varepsilon \rightarrow 0$. Reordenando la **ecuación (5)** y la diferenciación da una expresión para la resistencia a la polarización R_p .

$$R_p = \left[\frac{d\varepsilon}{di_{app}} \right]_{\varepsilon \rightarrow 0} = \left[\frac{\Delta\varepsilon}{\Delta i_{app}} \right]_{\varepsilon \rightarrow 0}$$

$$R_p = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 i_{corr} (\beta_a + \beta_c)} = \frac{B}{i_{corr}} \quad (6)$$

Por lo tanto, la pendiente $(d\varepsilon/di_{app})_{\varepsilon \rightarrow 0}$, en el origen de la curva de polarización, definida como resistencia a la polarización R_p , es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión.

$$B = \frac{\beta_a \beta_c}{2.3 (\beta_a + \beta_c)} \quad (7)$$

La ecuación Stern-Geary (**ver Ecuación 6**) establece la relación entre la densidad de corrosión (i_{corr}), es decir, la velocidad de corrosión, con la resistencia a la polarización. Esta ecuación recuerda la conocida Ley de Ohm, donde se establece que la diferencia de potencial entre dos puntos resulta en flujo de corriente limitado por la presencia de una resistencia.

La constante B (**ver Ecuación 7**) sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad y presenta una relación existente entre las pendientes de Tafel.

La velocidad de corrosión se determina con la siguiente ecuación:

$$V_{corr} = 0,129 \times \frac{PE}{D} \times i_{corr} \quad (8)$$

Donde:

V_{corr} = Velocidad de corrosión (mpy)

PE = Peso equivalente

D = Densidad (g/cm³)

i_{corr} = Densidad de Corrosión (A/cm²)

Para encontrar el peso equivalente de una aleación necesitamos determinar el número equivalente N_{EQ}^{-1} , el cual resulta de separar las unidades de masa de la aleación.

$$N_{EQ} = \sum \left(\frac{f_i}{a_i/n_i} \right) = \sum \left(\frac{f_i n_i}{a_i} \right) \quad (9)$$

Donde:

f_i = Fracción de masa (g)

n_i = Intercambio de electrones

a_i = Peso atómico (g)

Ventajas de la Resistencia a la Polarización.

- i. Es una técnica no destructiva debido a que emplea bajas perturbaciones
- ii. Proporciona velocidad de corrosión instantánea.
- iii. No se necesita de instrumentos sofisticados, solamente de un potencióstato y una celda de polarización electroquímica, por lo tanto es una técnica económica.

Limitaciones de la Resistencia a la Polarización.

- i. Es necesario que el potencial sea estable.
- ii. La caída óhmica en sistemas altamente resistivos lo hace poco recomendable.
- iii. Se necesita seleccionar una adecuada velocidad de barrido.

1.2. Medición de Potenciales con Electrodo de Referencia.

Para las mediciones de potencial se utilizan los que son llamados electrodos de referencia. Lo que se hace entonces es medir la diferencia de potencial entre el electrodo que se desea estudiar y el electrodo de referencia, que tiene un valor conocido de antemano.

Los requerimientos que debe tener un electrodo de referencia son:

1. Que el valor sea estable en el tiempo.
2. Que corresponda a un electrodo reversible.
3. Que sea polarizable, o sea que presente poca o nula variación de potencial ante un cambio de corriente.

Para establecer los valores de potencial de los electrodos de referencia se tomó como convención que el electrodo correspondiente a la reacción $2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2$ en las condiciones estándar (25°C, concentraciones de 1 normal, presiones de gases de 1 atmosfera y fases sólidas puras) se corresponde con el valor cero de potencial y se lo denominó electrodo estándar de hidrógeno, (**ver Figura 1.2**).

El electrodo de referencia típico es el denominado electrodo normal de hidrógeno, (ó electrodo estándar de hidrógeno) consiste en un electrodo de platino sobre el cual se ha depositado electrolíticamente platino, sumergido en una solución de HCl cuya actividad de iones H^+ es 1N, sobre la que se burbujea hidrógeno gaseoso a 1 atmósfera de presión. Por convención, se le asigna a este electrodo un potencial de 0,0 Volts a todas las temperaturas.

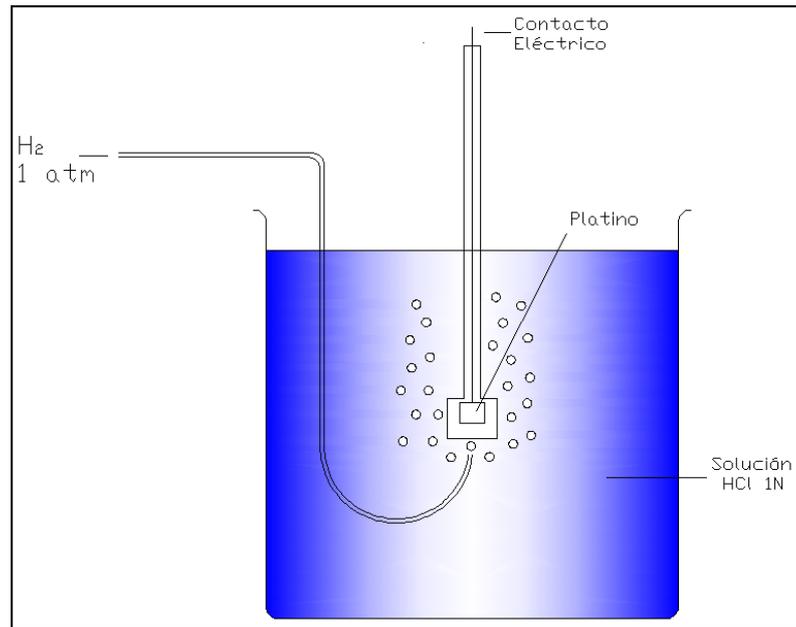


Figura 1.2 Electrodo Normal de Hidrógeno.

Electrodos de Referencia.

Además del electrodo de hidrógeno, cuyo armado y empleo es muy engorroso, pueden ser empleados otros electrodos de referencia como por ejemplo el de Calomel, el de Plata/Cloruro de Plata y el de Cobre/ Sulfato de Cobre.

- **Electrodo de Calomel Saturado (SCE):** (*Figura 1.3*) es usado principalmente bajo condiciones de laboratorio. Está compuesto de mercurio como metal y una solución de cloruro de potasio como electrólito con cloruro de mercurio (Calomel) como compuesto intermedio. El potencial del electrodo de Calomel depende de la concentración de Cloruro de Potasio empleado; las concentraciones empleadas son: saturado, 1 normal y 0,1 normal.

El electrólito en el electrodo de referencia y el electrólito en el cual es inmerso el electrodo a ser medidos son puestos en contacto mediante un disco de vidrio poroso o tubo capilar. El electrodo de referencia es normalmente construido y no es lo suficientemente duradero para mediciones en campo.

En el capítulo 2, se detallará su construcción y elementos constitutivos, con el cual se realizaron los ensayos electroquímicos.

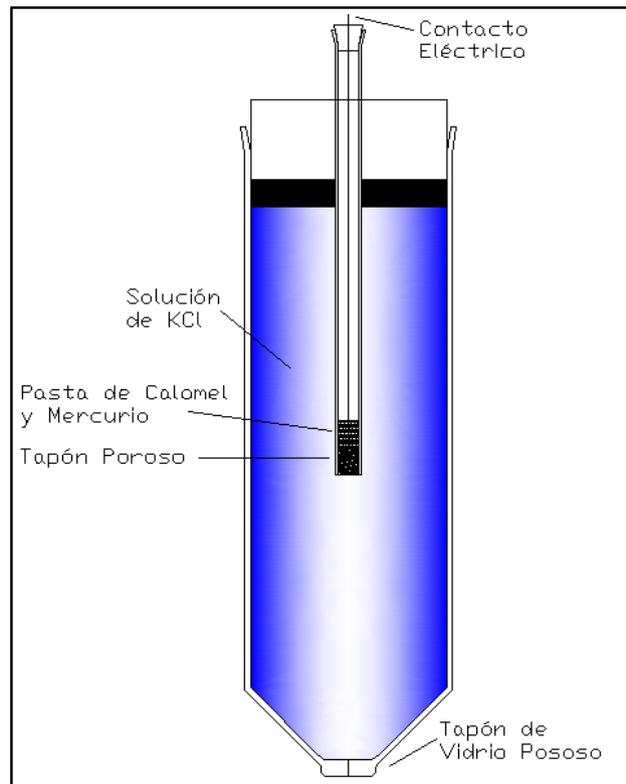


Figura 1.3 Electrodo de Calomel Saturado.

- **Electrodo de Plata/Cloruro de Plata (Ag/AgCl): (Figura 1.4)** es usado bajo condiciones de laboratorio y de campo. El metal que utiliza es la plata; la plata es recubierta con cloruro de plata. Existen dos tipos de electrodos de plata/cloruro de plata:

En el “**tipo húmedo**” del electrodo de plata, una solución de cloruro de potasio es usado como electrólito y el potencial del electrodo de referencia depende de la concentración de

cloruro de plata. Una solución 1 normal o bien saturada es comúnmente empleada. El electrólito en el electrodo de referencia y el electrólito en el cual es inmerso el electrodo a ser medido son puestos en contacto mediante un disco poroso o un tubo capilar.

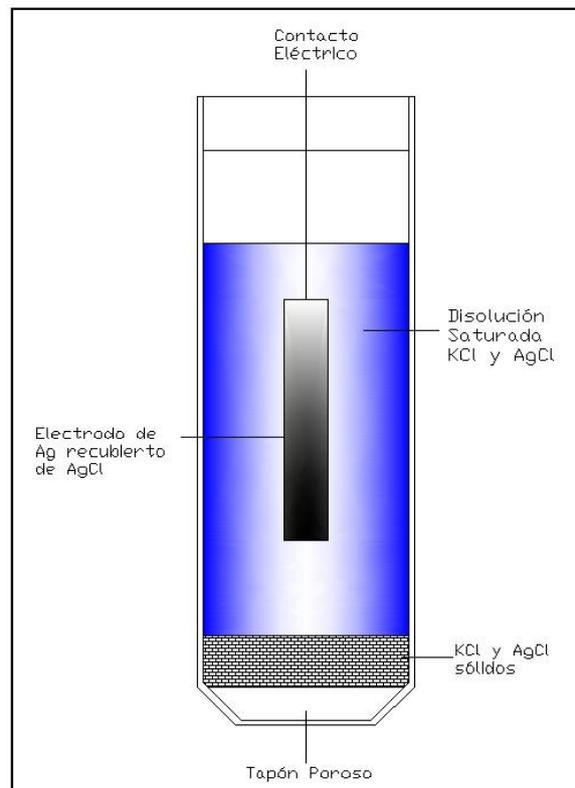


Figura 1.4 Electrodo de Plata/Cloruro de Plata.

En el electrodo de plata/cloruro de plata **"tipo seco"**, la plata recubierta con cloruro de plata es directamente inmersa en el electrólito que contiene el electrodo a ser medido. Este tipo de

electrodo de referencia es comúnmente usado en agua de mar, donde la concentración de cloruro (el ión importante respecto al potencial de este electrodo de referencia) es razonablemente constante. El electrodo de referencia de plata/cloruro de plata de tipo seco es particularmente fuerte y es ampliamente usado para medir potenciales de metales en agua de mar.

- **Electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre (Cu/CuSO_4):** (*Figura 1.5*) es ampliamente usado en medición de potenciales en suelos y agua fresca. Consiste de una varilla de alambre de cobre inmerso en una solución saturada de sulfato de cobre. El contacto entre el electrolito de sulfato de cobre y el electrolito externo es por medio de un tapón poroso, normalmente hecho de un material cerámico o madera. El electrodo de cobre/sulfato de cobre es particularmente resistente y barato.

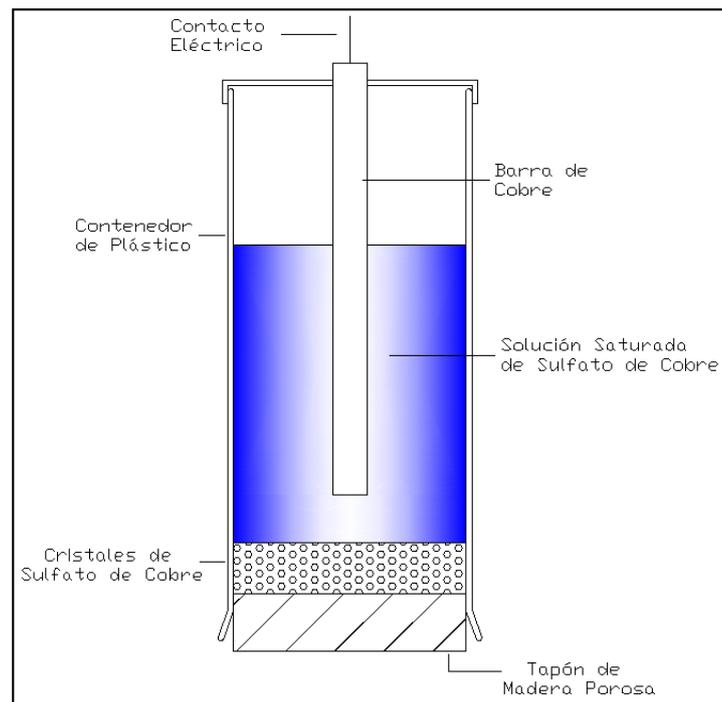


Figura 1.5 Electrodo de Cobre/Sulfato de Cobre.

Los potenciales de los comúnmente empleados electrodos de referencia son medidos respecto al electrodo de referencia de hidrógeno bajo condiciones de laboratorio. Los potenciales se registran en la **Tabla 1**.

Tabla 1.
Potenciales de Diversos Electrodo de Referencia
Respecto del Electrodo Normal de Hidrógeno.
Fuente: Curso de Corrosión Básica, NACE,
Octubre 2005.

Electrodo de Referencia	Potencial/ V_{enh}
Hidrógeno	0,0000
Calomel (Saturado)	+ 0,2415
Calomel (Normal)	+ 0,2888
Calomel (0,1 Normal)	+ 0,3333
Plata/Cloruro de Plata (Saturado)	+ 0,2250
Plata/Cloruro de Plata (Normal)	+ 0,2222
Plata/Cloruro de Plata (Tipo seco en agua de mar)	+ 0,2500
Cobre Sulfato de Cobre	+ 0,3160

1.2.1. Características de Selección del Electrodo.

- **Potencial Estable y Reproducible.**

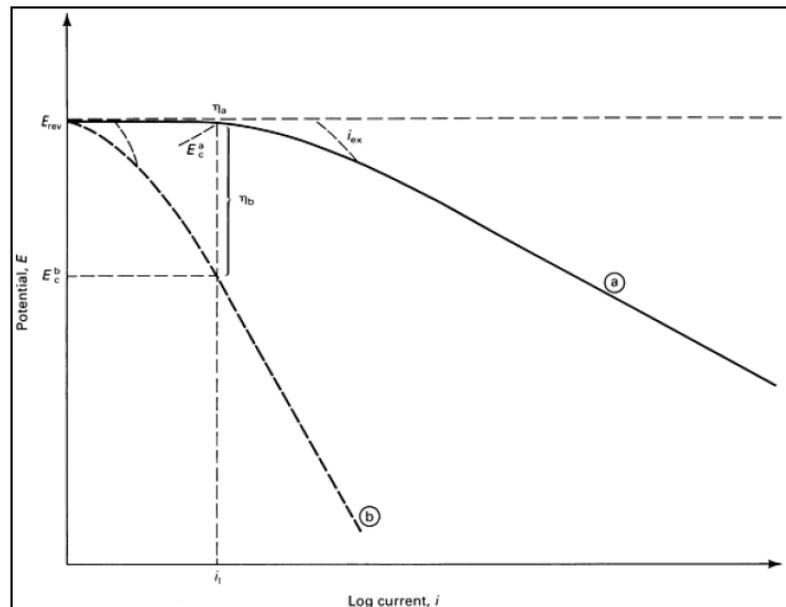
Los electrodos usados como de referencia deben ofrecer un aceptable potencial estable y reproducible que este libre de fluctuaciones significantes.

El electrodo de cobre/sulfato de cobre es un excelente ejemplo de un buen sistema electroquímico reversible; este es usado como un electrodo de referencia en el campo de la corrosión. Puede ser fácilmente construido sumergiendo una barra de cobre en una solución acuosa de sulfato de cobre.

Este electrodo es reversible, por una pequeña corriente catódica que produce la reacción de reducción ($\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$), mientras que una corriente anódica provoca una reacción de oxidación ($\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$).

- **Baja Polaridad.**

La polarización de los electrodos de referencia introduce un error en el potencial de medición. El potencial versus a la densidad de corriente responde a una curva de polarización, la que muestra un bajo sobrevoltaje y una alto intercambio de corriente, i_{int} , como se muestra en la **Figura 1.6** (línea a).



Fuente: ASM, Volumen 13 Corrosión, 1992

Figura 1.6 Curva de Polarización para un buen Electrodo de Referencia (Línea A) y un pobre Electrodo de Referencia (Línea B).

Una característica polarización pobre para un electrodo de referencia esta representado por la línea (b) (**ver Figura 1.6**). En este caso una pequeña densidad de corriente y produce un significativo cambio de potencial. Esto resulta en un gran cambio en el sobrepotencial. El electrodo representado por la línea (a) ofrece muchas características de polarización. Bajo la misma densidad de corriente, el

potencial del electrodo observado permanece muy cerca al valor reversible. El resultado del sobrepotencial es entonces despreciable.

- **El Potencial de Unión Líquida**

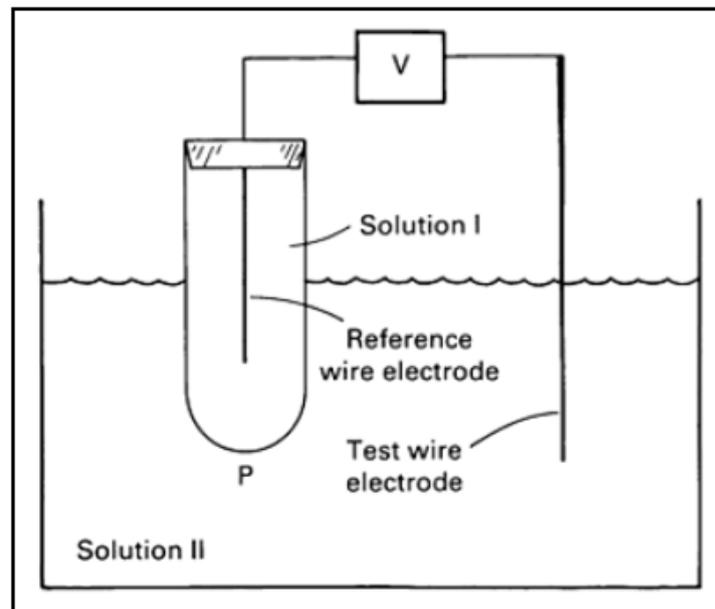
Los electrodos de referencia son hechos de un metal inmerso en un electrólito bien definido. En el caso del cobre/sulfato de cobre el electrólito es una solución acuosa saturada; para el electrodo de calomel, es una solución de cloruro de potasio saturado (KCl).

Este electrólito que caracteriza al electrodo de referencia entra en contacto con el medio líquido del electrodo de prueba (**ver Figura 1.7**). Hay un contacto directo entre diferentes medios acuosos. La diferencia en la composición química produce un fenómeno de interdifusión. En este proceso, excepto para algunos casos tales como KCl, los cationes y los aniones se mueven a diferentes velocidades. Sin embargo para el cloruro de hidrógeno (HCl) la solución esta en contacto con otro medio, los iones H^+ se mueven a mayor velocidad que los iones Cl^- .

Como resultado, aparece una separación de carga que aparece en el límite entre los dos líquidos (la unión líquida); esto produce una diferencia de potencial llamada el potencial de unión líquida. Este potencial de unión líquida está incluida en las mediciones de potencial, expresada como:

$$E = E_T - E_R + E_{LJP}$$

Donde E_T es el potencial desconocido a ser medido, E_R es potencial del electrodo de referencia, y E_{LJP} es el potencial de la unión líquida desconocida.



Fuente: ASM, Volumen 13 Corrosión, 1992

Figura 1.7 Celda Electroquímica con Potencial de Unión Líquida.

1.3. Curvas de Polarización.

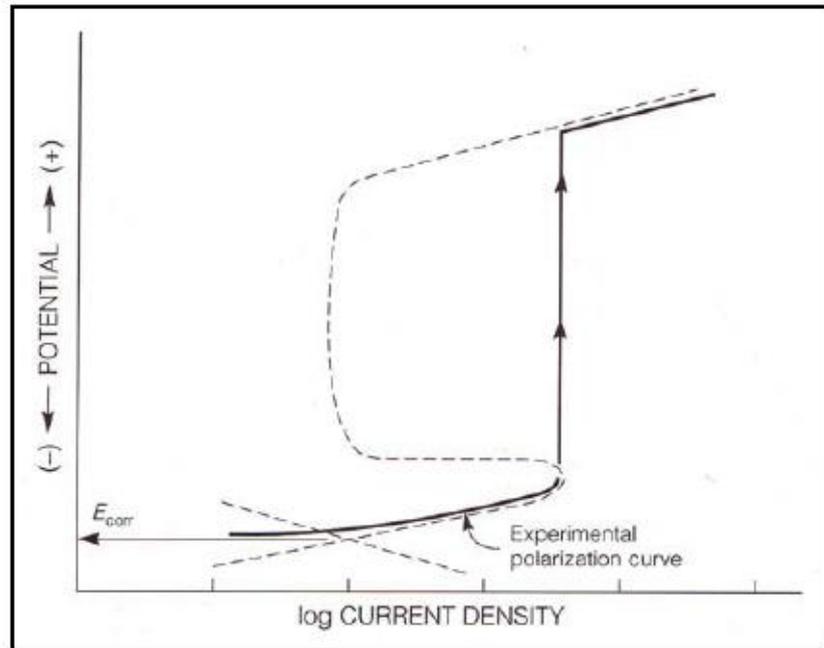
Las curvas de polarización muestran la interdependencia entre el potencial de electrodo y la intensidad de corriente (relaciones E vs i).

Las curvas galvanostáticas y potencioestáticas se muestran a continuación:

1.3.1. Curvas Galvanostáticas.

Las curvas galvanostáticas se obtienen aplicando una corriente constante y registrando el potencial alcanzando. Este tipo de curvas no es adecuada en aquellos casos en que los cambios bruscos en la curva E-i , tal como ocurre durante la pasivación.

Es evidente que los procedimientos galvanostáticos son insuficientes para definir una curva activa-pasiva correctamente porque el potencial no es en función de un solo valor de corriente. Sin embargo, la corriente es un simple valor en función del potencial. La **Figura 1.8** muestra la grafica de curva galvanostática.



Fuente: Denny A. Jones, 2ª edición, 1996

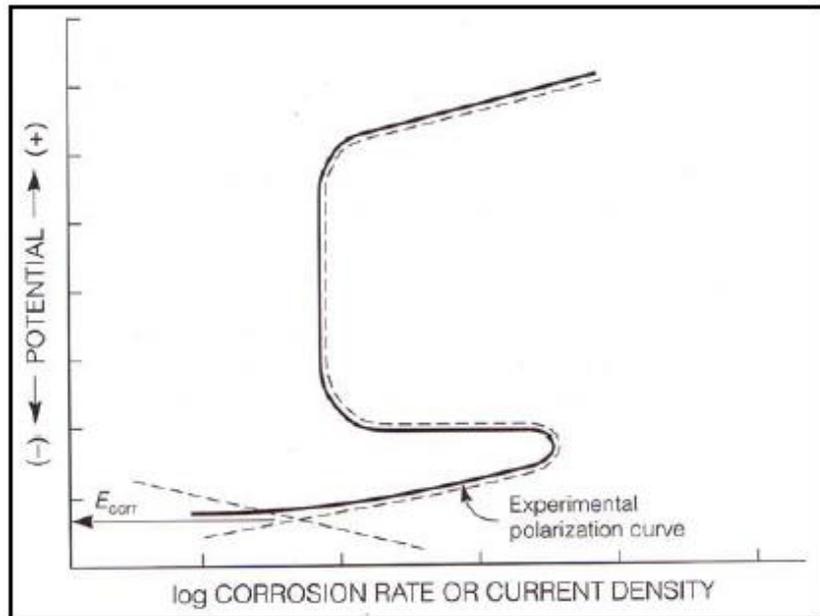
Figura 1.8 Curva de Polarización Galvanostática.

Una curva galvanostática se genera a partir del potencial de corrosión (E_{corr}) en la región activa, el incremento del sobrepotencial anódico y la densidad de corriente aplicada ($i_{app} = i_a - i_c$) se aproxima a la densidad de corriente anódica (i_a), como $i_a \gg i_c$. Por encima i_{crit} , sin embargo i_{app} no continúa la curva anódica en la región pasiva. La corriente se dispara por encima del i_{crit} incrementando el potencial sobre la región transpasaiva, y el lazo de la curva activo-pasivo no es mostrado.

Por lo tanto se concluye que las curvas galvanostáticas no sirven para estudiar sistemas pasivos.

1.3.2. Curvas Potenciostáticas.

Las curvas potenciostáticas se obtienen con un potencial constante y determinando la forma en la que varía la corriente. Un potencial constante que no sea afectado por la corriente que circula por el sistema, no puede conseguirse con circuitos tan simples como los galvanostáticos. En general se requiere un circuito electrónico que mantenga el potencial constante, y tenga una velocidad de respuesta suficientemente grande. La **Figura 1.9** muestra la grafica de una curva potenciostática.



Fuente: Denny A. Jones, 2ª edición, 1996

**FIGURA 1.9 CURVA DE POLARIZACIÓN
POTENCIOSTÁTICA.**

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA.

En este capítulo, se tratará todo lo relacionado con lo que se ha desarrollado en el laboratorio, para el diseño de la celda de polarización y elaboración de un electrodo de referencia de calomel saturado.

2.1. Circuito Galvanostático.

El circuito galvanostático mostrado en la **Figura 2.1** 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, utiliza un electrodo de trabajo, ET, en el cual se coloca la muestra a ensayar. El potencio/galvanostato suministra una corriente (I) al electrodo de trabajo, a través de un segundo electrodo, EA. El potencial del electrodo de trabajo es medido con respecto a un electrodo de referencia, ER. El puente salino y el

capilar de Luggin son usualmente incluidos para minimizar la interferencia de resistencia óhmica en el electrólito.

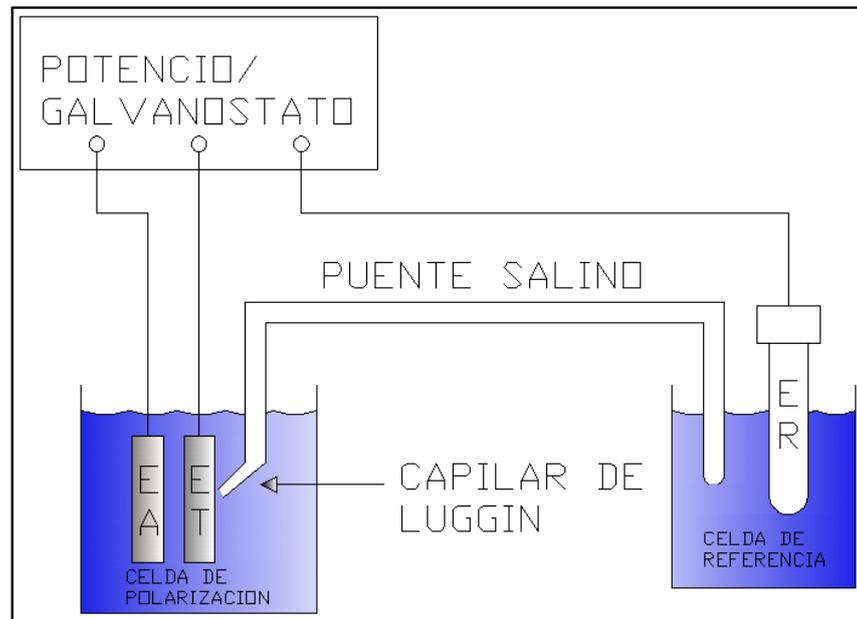


Figura 2.1 Circuito Esquemático para Mediciones Galvanostáticas.

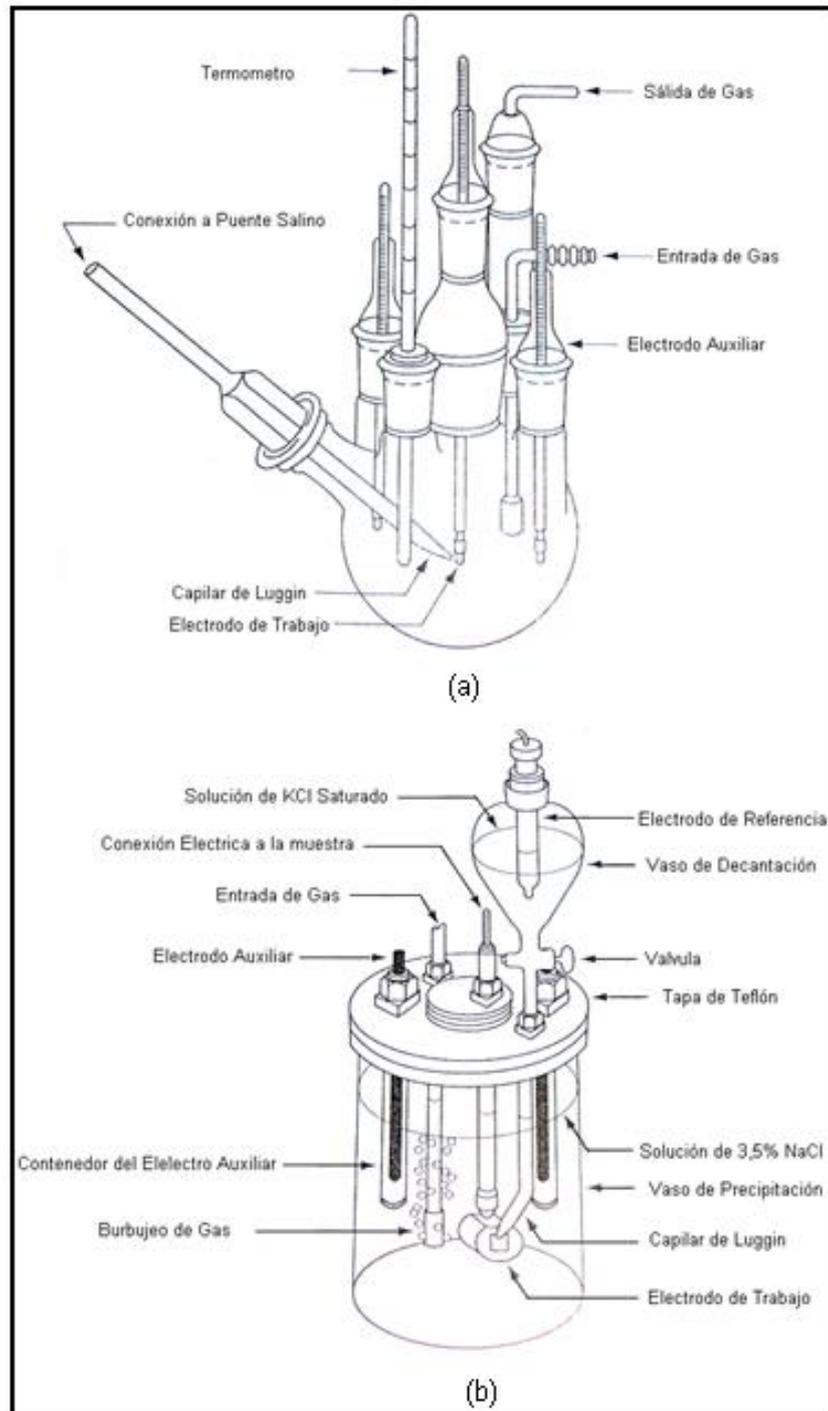
Esta celda funciona de la siguiente manera, el electrodo de trabajo, ET, es polarizado como cátodo cuando se conecta al terminal negativo del potenciómetro/galvanostato. El electrodo auxiliar, EA, se conecta al terminal positivo, este simultáneamente se polariza como un ánodo. El electrodo de trabajo se convierte en ánodo y el electrodo auxiliar en cátodo, cuando los terminales son invertidos.

El interés primordial es conocer el comportamiento del electrodo de trabajo, los electrodos auxiliares sirven para suministrar la corriente.

2.2. Diseño de la Celda de Polarización.

Para el diseño de la celda se consultó con dos tipos de diseños existentes (**ver Figura 2.2**) los cuales son aprobados según los estándares de la ASTM G5-82. La primera celda de polarización se encuentra disponible a la venta en tanto que la otra celda se puede construir artesanalmente, este fue el modelo construido para realizar los ensayos electroquímicos.

Su construcción es muy sencilla, se necesitaron elementos muy básicos para su elaboración, sin tener la necesidad de adquirir una celda comercial la cual resultaba ser muy costosa.



Fuente: Denny A. Jones, 2da edición, 1996

Figura 2.2. Diseño de Celda de Polarización Electroquímica, (a) Modelo Comercial y (b) Modelo Alternativo.

La siguiente **Figura 2.3** esquematiza la celda de polarización construida para fines de ensayos electroquímicos, esta es muy parecida a la de la **Figura 2.2 (b)**, esta celda fue construida en el laboratorio de corrosión.

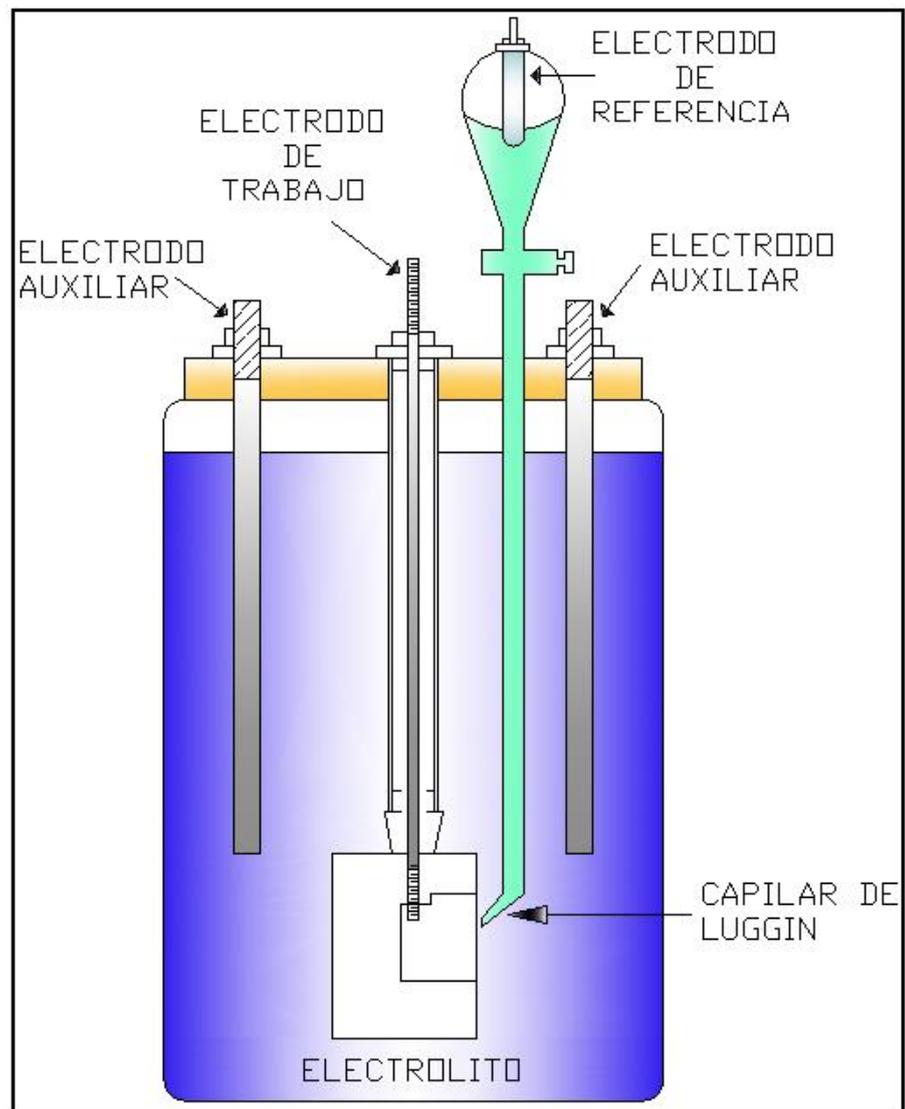


Figura 2.3 Esquema de Celda de Polarización Electroquímica.

Se mencionará a continuación cada uno de los elementos que conforman la celda de polarización, mencionando su ubicación y utilidad en la misma:

El electrodo de trabajo.- es localizado en el centro de la celda junto con un par de electrodos auxiliares para una mejor distribución de la corriente.

En el electrodo de trabajo se encuentran varios componentes que sirvieron para la realización de mediciones, y que estas no sean alteradas por el medio salino al que estará expuesto, sino solamente la cara expuesta al mismo.

El electrodo de trabajo es una varilla de acero inoxidable que está en contacto eléctrico con la muestra, la misma que está colocada en la porta probeta de Teflón, el cual es un material resistente a la corrosión. Este accesorio es de forma circular con una parte plana en la cara circular y en el mismo un agujero roscado en el que se producirá el contacto con la muestra metálica y la varilla de acero inoxidable. La muestra metálica es de forma circular y un área de 1,13 cm².

La **figura 2.4** esquematiza los componentes que existen en el electrodo de trabajo.

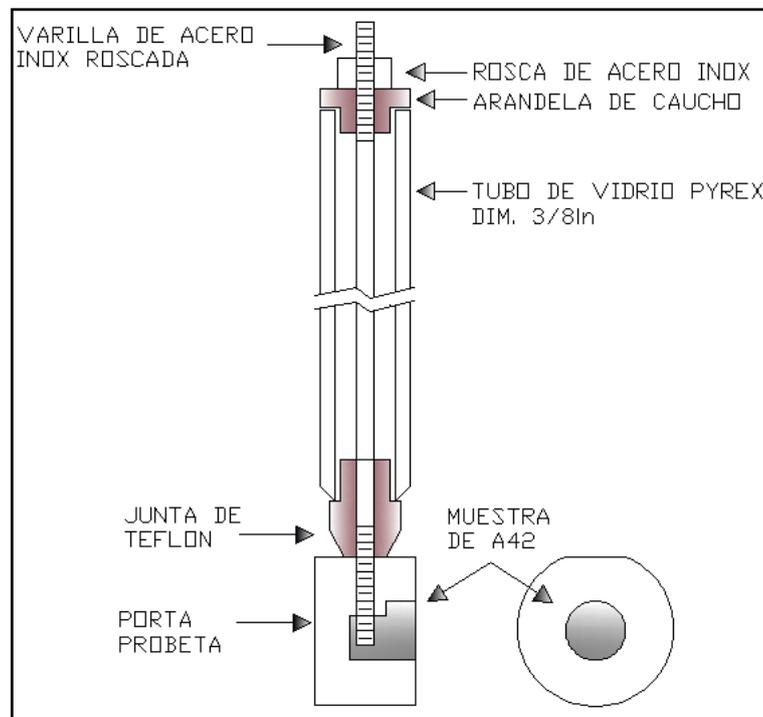


Figura 2.4 Componentes de Electrodo de Trabajo.

Tubo de vidrio Pyrex ($v = 3/8''$).- sirvió para proteger la varilla de acero inoxidable, con el fin de que solamente la cara expuesta de la muestra este en contacto con el electrólito corrosivo. En el extremo inferior encontraremos una junta de Teflón y arandelas de goma, las mismas sirvieron para prevenir filtraciones hacia el interior del tubo y la varilla de acero inoxidable se moje y el electrólito se filtre por la parte superior del porta probetas hacia el interior donde se encuentra la muestra, en el extremo superior del tubo Pyrex se encuentra una

tuerca de acero inoxidable y una arandela de goma la cual ajusta ambos extremos (**ver Figura 2.5**).

Electrodos auxiliares.- son hechos de un material inerte al electrólito, incluso bajo una fuerte polarización anódica. Para este caso seleccionamos dos varillas de acero inoxidable debido a que este material no producirá contaminación al electrólito.

Electrodo de referencia de calomel saturado.- es localizado en la parte externa de la celda, tal como se muestra en la **Figura 2.4**, el potencial del electrodo de trabajo es medido a través del capilar de Luggin y una solución de cloruro de potasio saturado el cual sirve como puente salino con respecto al electrodo de referencia.

2.3. Descripción del Procedimiento Experimental.

Para realizar un estudio experimental de resistencia a la polarización, lo mejor es acudir a la norma ASTM G59-97 "Práctica Estándar para Realizar Medidas de Resistencia a la Polarización Potenciodinámica".

1. Una vez que se obtiene la probeta a la dimensión necesaria para que esta ingrese al porta probeta sin tener este ninguna fuga con el fin de que el electrólito solo este en contacto directo con la cara expuesta del acero.
2. Se ensambla la celda de polarización electroquímica, colocando los electrodos auxiliares de acero inoxidable, luego el electrodo de referencia va dentro del capilar de Luggin, el cual debe de estar a 2 o 3 mm de la superficie del electrodo de trabajo.
3. Sin encender el potencio/galvanostato se conecta los cables a cada elemento de la celda electroquímica según corresponda por medio de lagartos de conexión.
4. Los cables de conexión tienen diferentes colores, el cable verde se conecta al electrodo de trabajo, el cable rojo a los electrodos auxiliares de acero inoxidable y el blanco al electrodo de referencia.

5. Aplicar un potencial de 30mV más negativo que el registrado en el potencial de corrosión a los 55 minutos.
6. Un minuto después que se aplique el potencial, se inicia un barrido en dirección anódica a 0,6V/h (0,2mV/s), registrando el potencial y la corriente continuamente.
7. Terminado el barrido cuando se alcanza un valor de 30 mV más positivo que el potencial de corrosión a los 55 minutos.
8. Graficar la curva de polarización.
9. Determinar gráficamente la resistencia a la polarización, R_p , como la tangente a la curva en el origen de la gráfica ($\Delta E=0$).

2.4. Muestra a Ensayar.

El acero con la designación ASTM A42, es un nuevo producto que se está distribuyendo a nivel nacional, entonces se necesitó conocer que empresa fabrica este tipo de varilla en el mercado ecuatoriano. Debido a lo antes mencionado se realizó el ensayo electroquímico para medir la velocidad de corrosión de este acero.

2.4.1. Acero Estudiado.

Las barras de acero corrugado fabricadas por la empresa NOVACERO S.A. cumplen con los requisitos establecidos por la norma ASTM A615M (barras lisas y corrugadas para hormigón armado obtenidas de palanquilla de acero)

Estas barras son fabricadas en Grado 420 (para la designación según la ASTM A615) o Grado A42 (para la designación de la NTE INEN 102)

La **tabla 2** presenta los porcentajes de componentes químicos que contiene el acero ASTM A42.

TABLA 2

Fuente: Revista Tecnológica ESPOL, 2009

Composición Química del Acero A42

Elemento	Contenido en %
Carbono	0,41480
Manganeso	0,55824
Silicio	0,08843
Azufre	0,03310
Potasio	0,02113
Cobre	0,02496
Níquel	0,02969

- **Metalografía.**

Se presenta una microfotografía que contiene ferrita-perlita de un acero ASTM A42 con medio contenido de carbono la cual se realizó un ataque de Nital al 2%. La siguiente **Figura 2.6** muestra la microfotografía a una ampliación de 200X.

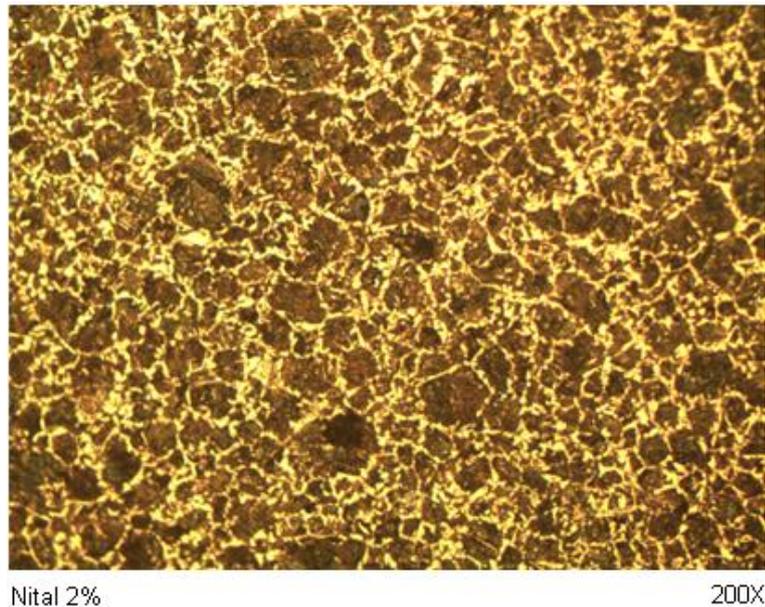


Figura 2.5 Microfotografía con una Ampliación de 200X del Acero ASTM A42

2.4.2. Preparación de la Muestra.

La preparación consistió en el corte de la barra de acero A42, con un arco de sierra, la longitud de corte es de 1 cm a una velocidad manual normal para no correr el riesgo de calentar demasiado el material, durante ese proceso se enfría con un líquido refrigerante tanto para refrigerar la muestra como la hoja de corte. Para obtener resultados correctos para los ensayos de corrosión, hemos cortado 2 muestras. Las cuales estaban

durante diferentes tiempos de exposición en la solución de 3,5% NaCl (1 y 4 horas respectivamente).

Para el pulido de la muestra se procedió a realizarlo en papel abrasivo de diferentes tamaños de grano (#180, #220, #400 y #600), con cada papel se elimina las rugosidades que quedaron al cortar la varilla. Sobre cada una de las muestras se debe realizar un solo ensayo de corrosión. Consecuentemente, para obtener valores aceptables de velocidades de corrosión, hay que tener un pulido espectacular (**ver Figura 2.6**).



Figura 2.6 Probetas de Acero ASTM A42 para Ensayos Electroquímicos.

2.5. Ensayos de Corrosión.

2.5.1. Medio Electrolítico Utilizado.

Para realizar los ensayos se utilizó un medio que simula el agua de mar, preparado con agua destilada al 3,5% en peso de NaCl. Esta solución se preparo con 36 g de NaCl por mil mililitros de agua destilada. El pH de solución utilizada era de 6,16.

2.5.2. Equipos Utilizados.

Entre los equipos utilizados tenemos un Potencio/Galvanostato, y una celda de corrosión, los cuales describiremos a continuación:

- **Potencio/Galvanostato.**

El potencio/galvanostato presentado por la EG&G Princeton Applied Research modelo 362. Los rangos máximos de corriente y voltaje de trabajo son 1A y 30V respectivamente.

Los principales dispositivos con los que consta se muestran en la **Figura 2.7**.

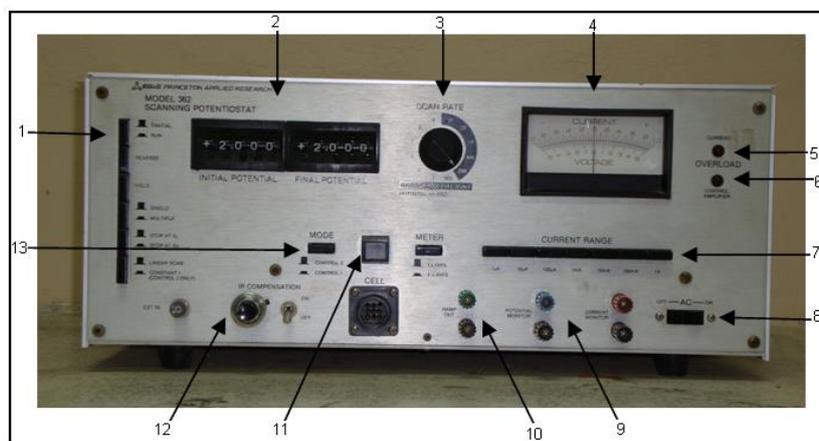


Figura 2.7 Potencio/Galvanostato Modelo 362.

1. Panel de seis botones que permiten seleccionar y controlar la técnica que se utilizará.
2. Registrador de potencial inicial y final con los que se fija los límites de prueba.
3. Perilla que permite seleccionar la velocidad de barrido con el que se generan corrientes y potenciales que varían linealmente en el tiempo.
4. Indicador de variación de voltaje o corriente.
5. Led indicador que advierte cuando la corriente del circuito excede el doble del rango seleccionado.
6. Led indicador que alerta en el caso de existir alguna mala conexión en el circuito.

7. Panel de siete botones con el que se escoge el rango de corriente adecuado para la prueba.
 8. Botón de encendido y apagado del potencio/galvanostato.
 9. Conexiones de entrada y salida para la tarjeta de adquisición de datos.
 10. Entrada de conexión para alguna fuente adicional de voltaje si la técnica lo requiere.
 11. Circuito compensador IR con su interruptor de encendido y apagado.
 12. Botón pulsador que acciona la celda electroquímica conectada al potencio/galvanostato.
 13. Pulsador para seleccionar la variable a controlar sea esta la corriente o el potencial.
- **Celda de Polarización Electroquímica.**

La celda utilizada es la que se muestra en la **Figura 2.8** la cual es una alternativa de la que comercialmente se encuentra en el mercado, las especificaciones utilizadas según la norma ASTM G5-94 son las siguientes:

- Dimensiones: Volumen de la Celda: 1000 ml.
- Distancia entre el contra electrodo y el electrodo de trabajo: 50 mm.
- Área del electrodo de trabajo: 1 cm².
- Electrodos: Electrodo de referencia: Calomel Saturado.
- Electrodo auxiliar: Acero Inoxidable.



Figura 2.8 Celda de Polarización Electroquímica (Diseño Terminado).

2.5.3. Resultados Obtenidos.

Los resultados obtenidos muestran la construcción del electrodo de referencia de calomel saturado y la obtención de las graficas potenciostáticas que permitieron obtener la resistencia a la polarización, lo que servirá para determinar la velocidad de corrosión en el acero ASTM A42.

- **Electrodo de referencia de calomel saturado.**

A continuación se presenta los componentes que conforma el electrodo de referencia para su construcción:

- ✓ Cloruro Mercurioso (Calomelanos)
- ✓ Mercurio (Metálico)
- ✓ Cloruro de Potasio (Sólido)
- ✓ Cloruro de Potasio (Solución Saturada)
- ✓ Alambre de Platino

La **Figura 2.9** muestra los componentes arriba mencionados en su estado original antes de conformar el electrodo de referencia de calomel saturado.

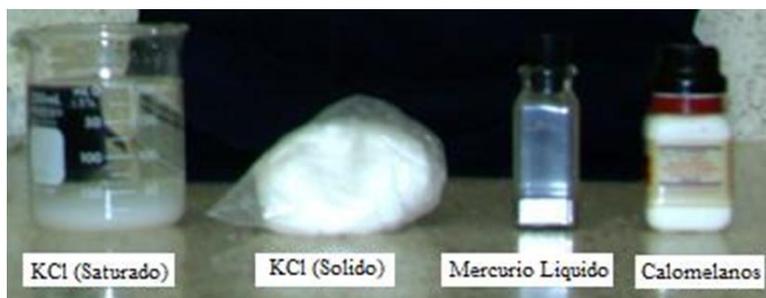


Figura 2.9 Elementos que Conforman el Electrodo de Referencia de Calomel Saturado.

Una vez obtenidos estos componentes se procedió a la elaboración del electrodo de referencia, para comprobar que nuestro electrodo de referencia cumple con uno comercialmente disponible realizamos pruebas de mediciones de potenciales, en la que consistió compararlo con el electrodo de plata/cloruro de plata y así determinar el diferencial de potencial que existe entre los dos, su valor fue de 28.2mV, con lo que se pudo comprobar que existía una diferencia de 3.8mV que el electrodo de calomel saturado construido en el laboratorio esta en buenas condiciones para realizar las mediciones que se necesitarán realizar. En la **Figura 2.10** se muestra el electrodo de referencia que fue construido en el laboratorio, con todos los elementos arriba mostrados.



Figura 2.10 Electrodo de Referencia de Calomel Saturado (Diseño Terminado).

- **Celda de polarización Electroquímica.**

Esta celda de polarización electroquímica fue construida de acuerdo al modelo alternativo (*ver Figura 2.2 b*), la misma que cumple con las especificaciones de la norma ASTM G5-82.

La siguiente **Figura 2.12**, se muestra en el momento en que se esta utilizando todo el equipo necesario para el instante en que se realizó una ensayo de polarización electroquímica en el acero ASTM A42.



Figura 2.12 Ensayo Electroquímico Realizado para el Acero ASTM A42.

- **Graficas de Resistencia a la Polarización.**

Cada una de las graficas que se mostraran a continuación estuvieron bajo un tiempo diferente de exposición en la solución de 3,5% NaCl, con el fin de obtener un potencial de corrosión totalmente diferente en cada intervalo antes de proceder con el ensayo electroquímico.

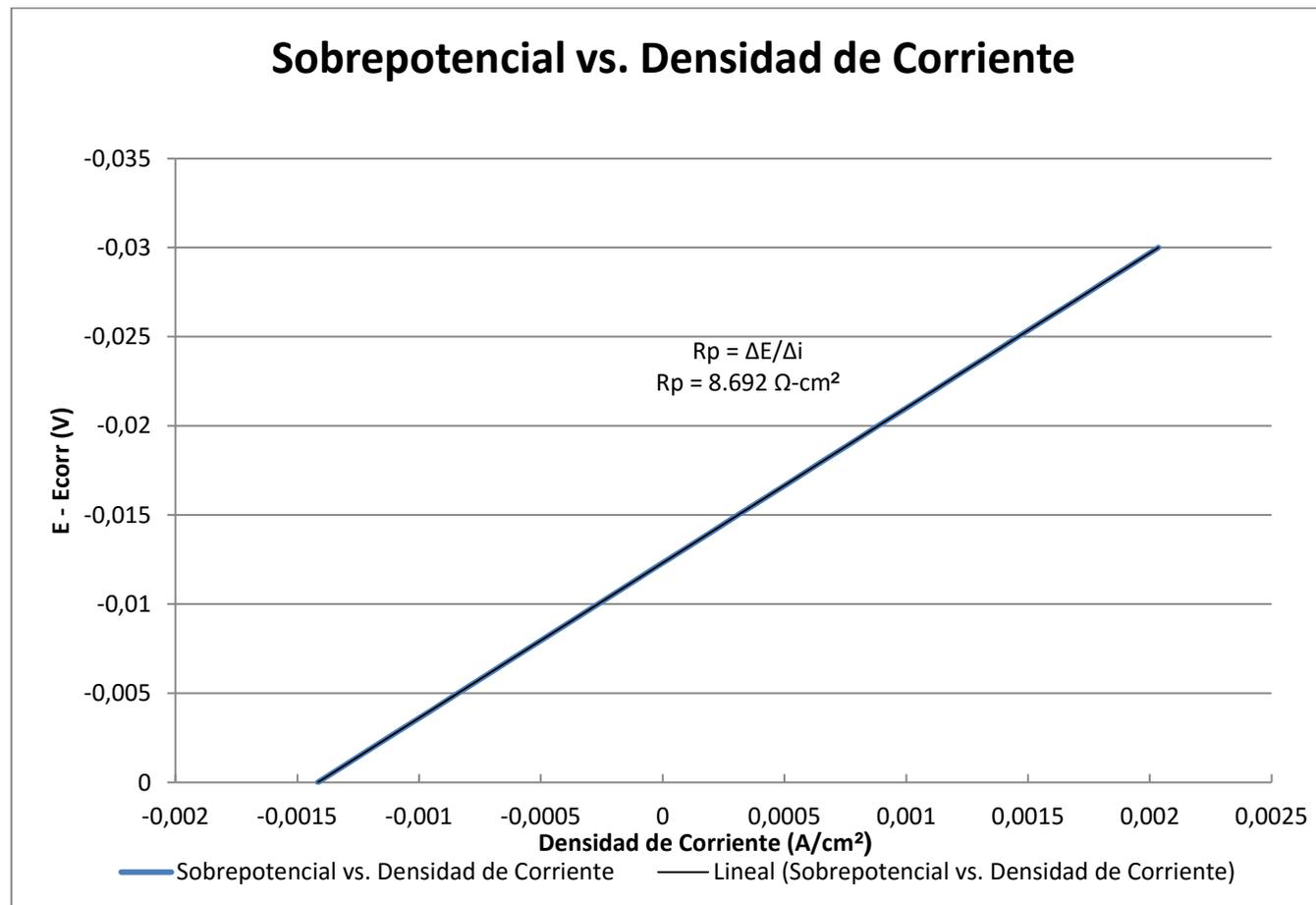


Figura 2.13 Gráfica E vs i (Después de 1 Hora de Inmersión).

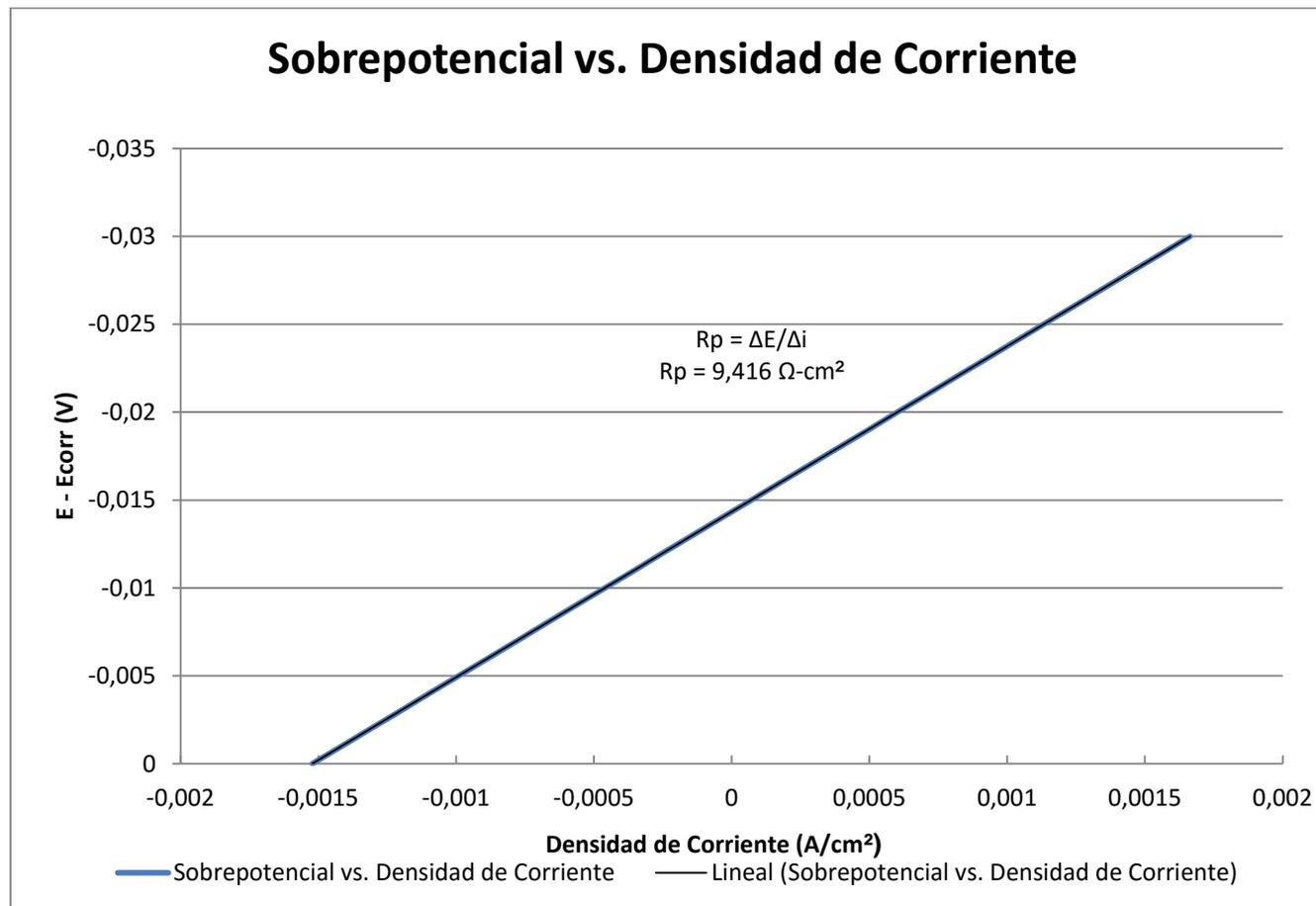


Figura 2.14 Gráfica E vs. i (Después de 4 Horas de Inmersión).

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo, se mostrará el análisis de resultados que se obtuvieron en los ensayos electroquímicos como también la resistencia a la polarización obtenida gracias a las curvas de polarización.

A continuación se analizará la técnica R_p utilizada en pruebas con probetas de hormigón tipo pórtland y puzolánico respectivamente, las mismas que se encuentran sumergidas en una solución de 3,5% NaCl.

Las mediciones se realizaron cada 15 días durante 5 meses, y se detallará este análisis para conocer el comportamiento del acero ASTM A42 embebido en hormigón.

Análisis de Probetas con Cemento Portland.

La técnica R_p utilizada para analizar este tipo de probetas nos muestra que la resistencia a la polarización (**ver Figura 3.1**) a través del tiempo disminuye aquellas que están SIN INHIBIDOR, en tanto las CON INHIBIDOR la resistencia a la polarización aumenta, estos resultados afectan directamente en la velocidad de corrosión de estas probetas, la misma aumenta y disminuye respectivamente.

La **Tabla 4** muestra los valores promedio de resistencia a la polarización para el cemento pórtland, indicando el tipo de inhibidor y los lapsos de tiempo de cada 15 días para la toma de datos.

Análisis de Probetas con Cemento Pórtland.

Para este tipo de probetas podemos decir (**ver Figura 3.2**) que tanto para las SIN INHIBIDOR y CON INHIBIDOR ambas tienden a disminuir su resistencia a la polarización y esto causa un aumento de la velocidad de corrosión en las varillas de acero ASTM A42

La **Tabla 5** muestra los valores promedio de resistencia a la polarización para el cemento puzolánico, indicando el tipo de inhibidor y los lapsos de tiempo de cada 15 días para la toma de datos.

Tabla 3

**Valores Promedio de Resistencia a la Polarización
Para Probetas con Cemento Pórtland.**

Fuente: C. Panchana, Proyecto de Graduación, 2010.

Resistencia a la Polarización Promedio ($\Omega\text{-cm}^2$)		
	Contaminación con Cloruros	
Días	Sin Inhibidor	Con Inhibidor
15	230385,7	75422,2
30	27009,8	39836,5
45	91776,3	78395,3
60	86481,7	96929,4
75	78188,8	59734,4
90	88389,1	69935,2
105	102480,6	30517,3
120	81408,2	77396,7
135	93345,5	118760,4
150	64176,0	106189,0

Tabla 4

**Valores Promedio de Resistencia a la Polarización
Para Probetas con Cemento Puzolánico.**

Fuente: W. Huiracocha, Proyecto de Graduación, 2010.

Resistencia a la Polarización Promedio ($\Omega\text{-cm}^2$)		
	Contaminación con Cloruros	
Días	Sin Inhibidor	Con Inhibidor
15	286277,92	275908,25
30	52594,012	86835, 592
45	43721,878	105500,41
60	70944,271	111280,24
75	44813,852	85320,844
90	46592,709	183364,68
105	64167,088	94143,949
120	53407,424	85227,84
135	83546,048	72919,517
150	51544,429	69578,076

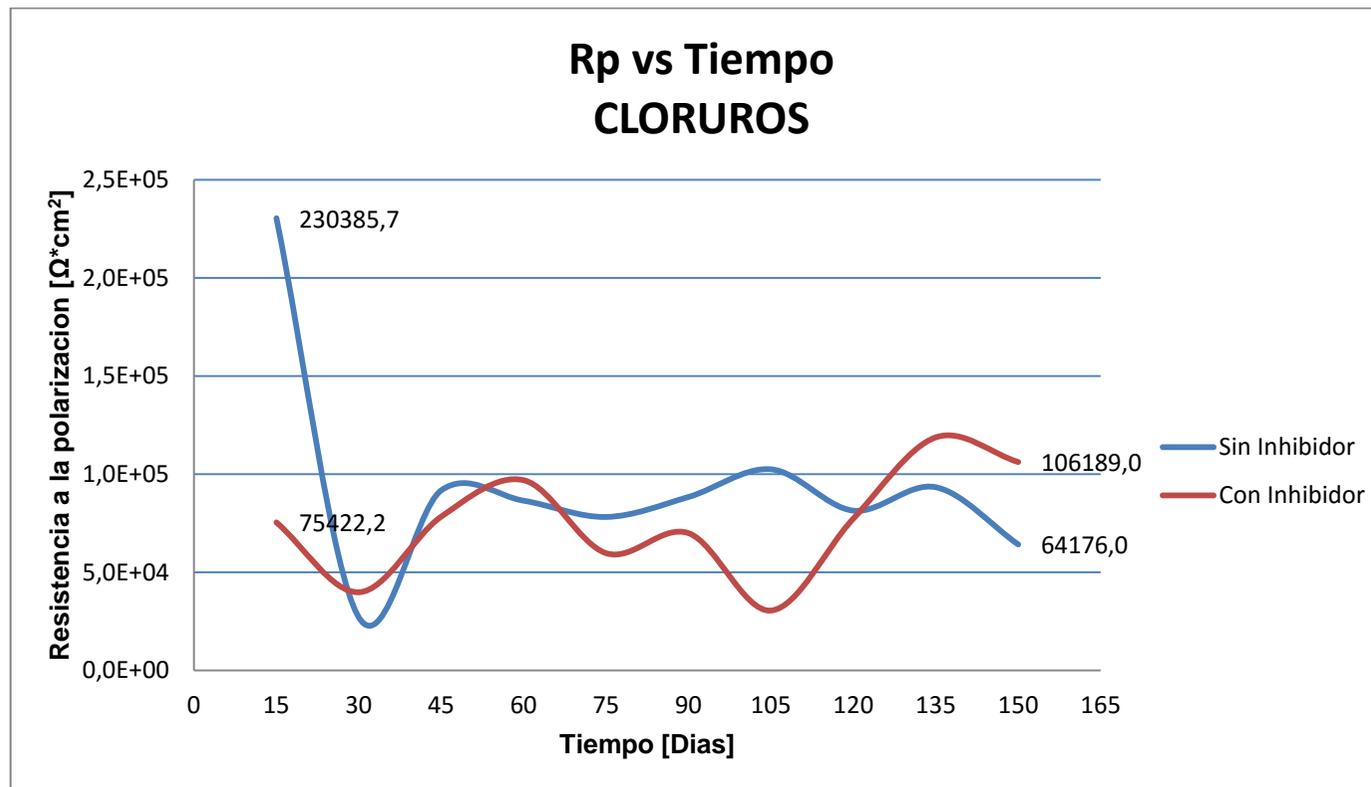


Figura 3.1 Resistencia a la Polarización vs. Tiempo, para Probetas con Cemento Pórtland Sumergidas en una Solución de 3,5% de NaCl.

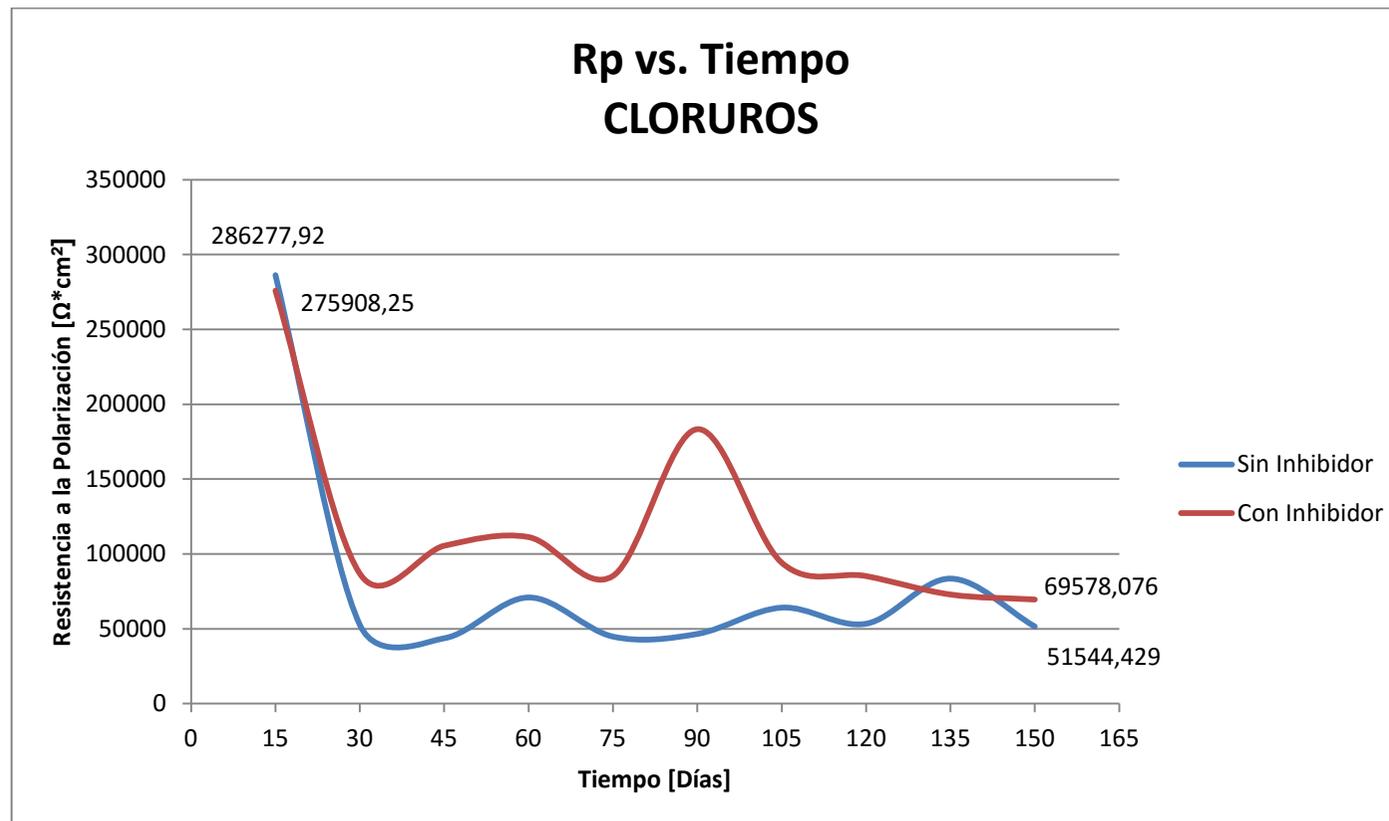


Figura 3.2 Resistencia a la Polarización vs. Tiempo, para Probetas con Cemento Puzolánico

Sumergidas en una Solución de 3,5% de NaCl.

3.1. Determinar la Resistencia a la Polarización (R_p).

La resistencia a la polarización se obtuvo de una manera muy sencilla, una vez obtenida la curva de polarización se procede a linealizar la curva hasta obtener un valor de pendiente, dicho valor es nuestro valor de R_p .

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

$$R_p = 8,692 \Omega - \text{cm}^2$$

3.2. Cálculo de la Velocidad de Corrosión.

Retomamos lo antes dicho en el capítulo 1, tomamos los valores de las constantes de Tafel anódica y catódica ($\beta_a = \beta_c = 0,3 \text{ V/década}$) para luego reemplazarlos en la **ecuación 7**, y así determinar la constante de proporcionalidad.

$$B = \frac{\beta_a \times \beta_c}{2,3 (\beta_a + \beta_c)}$$

$$B = \frac{0,3 \times 0,3}{2,3 (0,3 + 0,3)} = 0,0652 \text{ V}$$

Para encontrar la densidad de corrosión aplicaremos la **ecuación 6**.

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

$$i_{corr} = \frac{0,0652}{8,692} = 0,0075 \text{ A/cm}^2$$

Antes de encontrar la velocidad de corrosión determinaremos el peso equivalente (**ver ecuación 9**) del acero estudiado de acuerdo a los datos de composición química mostrados en la tabla 2 del capítulo 2.

$$PE = N_{EQ}^{-1}$$

$$N_{EQ} = \frac{(0,4148)(2)}{12,011} + \frac{(0,55824)(2)}{54,9380} + \frac{(0,08843)(2)}{28,085}$$

$$N_{EQ} = 0,09568$$

$$PE = \frac{1}{0,09568} = 10,4504$$

Finalmente encontramos la velocidad de corrosión del acero ASTM A42 con la **ecuación 8**.

$$V_{corr} = 0,129 \times \frac{PE}{D} \times i_{corr}$$

$$V_{corr} = 0,129 \times \frac{10,4504}{7,87} \times 0,0075$$

$$V_{corr} = 1,28 \times 10^{-3} \text{ mpy}$$

La siguiente tabla resume el comportamiento para las dos muestras que estuvieron 1 y 4 horas expuestas a la solución de 3,5% NaCl.

TABLA 5
Resultados Obtenidos de Muestras Expuestas al
Medio 3,5% NaCl.

R_p ($\Omega - cm^2$)	B (V)	i_{corr} (A/cm ²)	PE	D (g/cm ³)	V_{corr} (mpy)
8,692	0,0652	0,0075	10,4504	7,87	1,28x10 ⁻³
9,416	0,0652	0,0069	10,4504	7,87	1,18x10 ⁻³

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.

1. La técnica de Resistencia a la Polarización utilizada en este trabajo permitió identificar la velocidad de corrosión de una varilla de acero ASTM A42 en una solución de 3,5% NaCl.
2. Esta técnica utilizada es sencilla y se logran obtener resultados en pocos minutos, aunque este método no es la más efectivo debido a que existen otros más precisos como el método Espectroscopía de Impedancia Electroquímica (EIS), pero podemos obtener una perspectiva clara de los niveles de degradación que se desean obtener.

3. Los resultados se lograron obtener controlando un rango de potencial, perturbando al sistema de su potencial de equilibrio a otro valor de potencial anódico.

4. La resistencia a la polarización aumenta conforme aumente el tiempo de exposición en la solución en la que se realizó la experimentación.

4.2.Recomendaciones.

1. Se sugiere que para próximas experimentaciones las probetas estén mayor tiempo de exposición en la solución de 3,5% NaCl y se puedan obtener resultados más efectivos.

2. Se deberá realizar cambios de la solución de 3,5% NaCl al menos cada dos ensayos para así evitar la contaminación y esto resulte en una variación de los resultados.

3. Es preferible mantener el Potencio/Galvanostato y la celda electroquímica en perfectas condiciones antes de cada ensayo diario.

4. Realizar otras técnicas electroquímicas que sirvan para el estudio de otros materiales sometidos a medios agresivos.

APÉNDICES

APÉNDICE A

FRAGMENTO DE NACE CORROSION ENGINEER'S REFERENCE BOOK. VALUES OF THE CONSTANT B FOR THE POLARIZATION RESISTANCE METHOD

Corroding System	b_a , mV	b_c , mV	B, mV
Theoretical	30	30	6.5
(Values of B calculated from arbitrary	30	60	9
b_a and b_c values using formula on	30	120	10
previous page; b_a and b_c values	30	180	11
can be interchanged.)	30	∞	13
	60	60	13
	60	90	16
	60	120	17
	60	180	20
	60	∞	26
	90	90	20
	90	120	22
	90	180	26
	90	∞	39
	120	120	26
	120	∞	52
	180	180	39
	180	∞	78
Iron, 4% NaCl, pH 1.5	-	-	17
Iron, 0.5N H ₂ SO ₄ , 30 C	-	-	17
Iron, 1N H ₂ SO ₄	-	-	10-20
Iron, 1N HCl	-	-	18-23
Iron, 0.02M citric acid, pH 2.6. 35 C	-	-	12
Carbon steel, seawater	57	∞	25
Carbon steel, 1N Na ₂ SO ₄ , H ₂ , pH 6.3, 30 C	-	-	19
304L SS, 1N H ₂ SO ₄ , O ₂	inf.	50	22
304 SS, lithiated water, 288 C	85	160	24
304 SS, 3% NaCl, 90 C	inf.	50	22
430 SS, 1N H ₂ SO ₄ , H ₂ , 30 C	-	-	20
600 alloy, lithiated water, 288 C	82	160	24
Al 1199, 1N NaCl, pH 2, 30 C	-	-	44
Aluminum, seawater	45	600	18
Zircaloy 2, lithiated water, 288 C	inf.	186	81
OFHC Copper, 1N NaCl, H ₂ , pH 6.2, 30 C	-	-	26

Source: Adapted from a collection of literature values compiled by Florian Mansfeld, *Electrochemical Techniques for Corrosion*, R. Baboian, Editor, NACE, pp. 18, 26, 1977.

APÉNDICE B

FRAGMENTO DE NACE CORROSION ENGINEER'S REFERENCE BOOK

POLARIZATION RESISTANCE METHOD FOR DETERMINING CORROSION RATES

Defining the polarization resistance R_p as

$$R_p = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial I} \right)_{\Phi_{\text{corr}}}$$

and combining the constants as

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

the corrosion current I_{corr} can be calculated as

$$I_{\text{corr}} = \frac{b_a b_c}{2.303(b_a + b_c)} \left(\frac{\partial I}{\partial \Phi} \right)_{\Phi_{\text{corr}}} \\ = \frac{B}{R_p}$$

The dimension of R_p as determined from a potential-current plot is ohms (Ω). In order to obtain a value of R_p , which is independent of the electrode surface and which can be converted into corrosion rates, polarization resistance values should be reported in $\Omega \cdot \text{cm}^2$ (e.g., $\text{mV}/\text{mA}/\text{cm}^2$).

See following page for typical values for constant B.

Source: F. Mansfield in *Electrochemical Techniques for Corrosion*, R. Baboian, Editor, NACE, pp. 18-26, 1977.

BIBLIOGRAFÍA

1. Princeton Applied Research, Basic of Corrosion Measurements, Applied Instruments Group.
2. Nace Corrosion Engineer's Reference Book, Third Edition, 2002.
3. ASM Metals Handbook, Volumen 13, Corrosion, 9th Edition.
4. Curso de Corrosión Básica, Nace International, Octubre 2005.
5. ASTM International, G59 – 97 (Reapproved 2003).
6. ASTM International, G5 – 94 (Reapproved 1999).
7. Denny A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 2da Edition, 1996
8. J. R. Galvele & G. S. Duffó, Degradación de Materiales Corrosión,
9. Corral F. Rodrigo & Peña E. Julián, Revista Tecnológica ESPOL, 2009.

10. C. PANCHANA. "Influencia del Carboxilato de Amina en la Velocidad de Corrosión del Acero A42 en Hormigones Diseñados con Cemento Portland Tipo II" (Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010).

11. W. HUIRACUCHA. "Determinación de la Velocidad de Corrosión del Acero A42 en Hormigones Diseñados con Cemento Tipo Puzolánicos Mediante Técnicas Cinéticas de Laboratorio" (Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010).

12. V. BRAVO. "Estudio de la Resistencia a la Polarización Para Materiales Expuestos a Corrosión Atmosférica" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1996).

BIBLIOGRAFÍA

1. Princeton Applied Research, Basic of Corrosion Measurements, Applied Instruments Group.
2. Nace Corrosion Engineer's Reference Book, Third Edition, 2002.
3. ASM Metals Handbook, Volumen 13, Corrosion, 9th Edition.
4. Curso de Corrosión Básica, Nace International, Octubre 2005.
5. ASTM International, G59 – 97 (Reapproved 2003).
6. ASTM International, G5 – 94 (Reapproved 1999).
7. Denny A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 2da Edition, 1996
8. J. R. Galvele & G. S. Duffó, Degradación de Materiales Corrosión,
9. Corral F. Rodrigo & Peña E. Julián, Revista Tecnológica ESPOL, 2009.

10. C. PANCHANA. "Influencia del Carboxilato de Amina en la Velocidad de Corrosión del Acero A42 en Hormigones Diseñados con Cemento Portland Tipo II" (Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010).

11. W. HUIRACUCHA. "Determinación de la Velocidad de Corrosión del Acero A42 en Hormigones Diseñados con Cemento Tipo Puzolánicos Mediante Técnicas Cinéticas de Laboratorio" (Proyecto de Grado, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010).

12. V. BRAVO. "Estudio de la Resistencia a la Polarización Para Materiales Expuestos a Corrosión Atmosférica" (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1996).