



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

**“DETERMINACION DE CURVAS DE POLARIZACION  
POTENCIOSTATICAS Y GALVANOSTATICAS PARA CONOCER LA  
VELOCIDAD DE CORROSION EN ACEROS A42 E INOX 304 A  
INMERSION EN AGUA AL 3.5% DE CLORURO DE SODIO”**

## **PROYECTO DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

## **INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

**Eddy Roger Iturralde Borbor**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2010**

## **AGRADECIMIENTO**

Al Ing. Julián Peña y la Ing. Vanessa Valarezo por el tiempo prestado en la elaboración del trabajo de tesis. A familiares, amigos y amigas que siempre estuvieron en todo momento, ayudándome y colaborando para la realización de este trabajo.

## **DEDICATORIA**

A Dios, padre celestial y María Auxiliadora, por tenerme siempre bajo su amparo y protección.

A mis padres y hermanos por ser la fuente de mi inspiración y ejemplo de superación.

A mis abuelitos y mi tío por apoyarme desde el cielo para obtener este logro.

## **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 POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Eddy Roger Iturralde Borbor

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Francisco Andrade S.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Julián Peña E.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Mauricio Cornejo M.  
VOCAL

---

Ing. Andrés Rigail C.  
VOCAL

# TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Francisco Andrade S.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Julián Peña E.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Mauricio Cornejo M.  
VOCAL

## RESUMEN

El presente proyecto consistió en determinar curvas de polarización potencioestáticas y galvanostáticas para así conocer la velocidad de corrosión en los aceros ASTM 615 (A42) e INOX 304 a inmersión de agua al 3.5% de cloruro de sodio empleando la técnica de Stern y Geary.

La dificultad que se presentó en dicho proyecto es la elaboración de una celda electroquímica y a su vez la construcción de un electrodo de Calomel, estos, se lo realizó con materiales de origen local, generando así una herramienta práctica para el estudio de corrosión en cualquier material metálico, ya sea para proyectos futuros o como práctica para estudiantes.

La celda electroquímica elaborada, demostró una buena confiabilidad de los resultados obtenidos, esto se lo demostró mediante la realización de varias pruebas en las mismas condiciones y por las técnicas mencionadas anteriormente a utilizarse en dicho proyecto, mostrando así una estabilidad en los estudios que se realizaron, y así valorar la degradación del acero, teniendo en cuenta que este fue el objetivo principal.

Cabe recalcar que el procedimiento a seguir para la elaboración de dicho proyecto y pruebas realizadas, están remitidas bajo la norma ASTM G5 – 94 y la ASTM G102–89, el correcto funcionamiento del electrodo construido, se lo comprobó mediante medidas con respecto al electrodo de plata cloruro de plata (Ag/AgCl), y

así, luego de realizadas las distintas pruebas se procede a los análisis y discusiones de las mismas, viendo las tendencias que estas presentaron y a su vez comparándolas con resultados obtenidos en probetas embebidas en hormigón, datos que fueron proporcionados por un compañero que estudio el comportamiento de estos aceros embebidos en el hormigón, para así dar a conocer las debidas conclusiones y recomendaciones del análisis realizado.



## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1.	
1. CURVAS DE POLARIZACIÓN EN ACEROS SOMETIDOS A ENSAYOS	
ACELERADOS.....	3
1.1 Curvas galvanostáticas y potencioestáticas.....	3
1.2 Equipos y Accesorios.....	8
1.3 Métodos e Interpretación de Análisis.....	13
1.4 Aplicaciones.....	22
CAPITULO 2.	

2. DISEÑO Y MONTAJE DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA PARA ENSAYOS CINÉTICOS DE CORROSIÓN.....	26
2.1 Descripción de Materiales y reactivos.....	26
2.2 Equipos y accesorios necesarios.....	30
2.3 Proceso y Construcción de Celda Electroquímica.....	36
2.4 Proceso y Construcción de Electrodo de Referencia de Calomel....	42
2.5 Ensayo y pruebas a realizar según Norma ASTM G5–94 “Método estándar de referencia para mediciones potencioestáticas y potenciodinámicas de polarización anódica”.....	53
CAPITULO 3.	
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	63
3.1 Curvas Potencioestáticas y Galvanostáticas de aceros A42 e INOX 304 sin inyección de gas.....	63
3.2 Curvas Potencioestáticas y Galvanostáticas de aceros A42 e INOX 304 con inyección de gas.....	65
3.3 Tendencia y comparación con resultados obtenidos en Hormigón.....	67
3.4 Cálculo de Velocidad de corrosión ASTM G 102–89 “Práctica estándar para el cálculo de tasas de corrosión e información relacionada con mediciones electroquímicas”.....	70

## CAPITULO 4.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....75

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Valores de potencial para electrodos de referencia, tomando como referencia al SHE.....14
Tabla 2	Datos del acero ASTM 42 sin inyección de oxígeno.....55
Tabla 3	Datos del acero ASTM 42 con inyección de oxígeno.....57
Tabla 4	Datos del acero INOX 304 sin inyección de oxígeno.....58
Tabla 5	Datos del acero INOX 304 con inyección de oxígeno.....60

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Circuito eléctrico utilizado en mediciones galvanostáticas.....	4
Figura 1.2	Descripción esquemática del funcionamiento de un potencióstato.....	7
Figura 1.3	Comparación entre curvas de polarización galvanostática y potenciostática.....	8
Figura 1.4	Representación esquemática de una celda de corrosión.....	9
Figura 1.5	Montaje de probetas según Hoey y Cohen.....	11
Figura 1.6	Equipos utilizados durante el estudio.....	12
Figura 1.7	Capilar de Luggin.....	15
Figura 1.8	Apariencia de las primeras curvas de polarización en aceros inoxidables .....	18
Figura 1.9	Relaciones parciales que componen la curva de polarización de la Fig. 1.8.....	20
Figura 1.10	Curva de polarización anódica de un acero inoxidable en ácido sulfúrico 1N.....	23
Figura 2.1	Cloruro de Potasio.....	27
Figura 2.2	Cloruro de Potasio (Solución Acuosa).....	28
Figura 2.3	Mercurio.....	28
Figura 2.4	Cloruro Mercurioso.....	29
Figura 2.5	Varilla de Platino Quirúrgico.....	30
Figura 2.6	Varilla Acero ASTM A42.....	30
Figura 2.7	Potenciostato.....	31
Figura 2.8	Graficador XY.....	34
Figura 2.9	Computador.....	34
Figura 2.10	Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).....	35
Figura 2.11	Electrodo Elaborado y Electrodo Comercial de Calomel.....	36

Figura 2.12	Curva Potencioestática y Galvanostática sin O <sub>2</sub> Acero ASTM 42.....	56
Figura 2.13	Curva Potencioestática y Galvanostática con O <sub>2</sub> Acero ASTM 42.....	58
Figura 2.14	Curva Potencioestática y Galvanostática sin O <sub>2</sub> Acero INOX 304.....	60
Figura 2.15	Curva Potencioestática y Galvanostática con O <sub>2</sub> Acero INOX 304.....	62
Figura 3.1	Curvas Potencioestáticas sin inyección de O <sub>2</sub> .....	64
Figura 3.2	Curvas Galvanostáticas sin inyección de O <sub>2</sub> .....	65
Figura 3.3	Curvas Potencioestáticas con inyección de O <sub>2</sub> .....	66
Figura 3.4	Curvas Galvanostáticas con inyección de O <sub>2</sub> .....	67
Figura 3.5	Curvas Potencioestáticas con y sin inyección de O <sub>2</sub> .....	68
Figura 3.6	Curvas Galvanostáticas con y sin inyección de O <sub>2</sub> .....	69

## ABREVIATURAS

e.t.	Electrodo de Trabajo
e.r.	Electrodo de Referencia
c.e.	Contraelectrodo
i	Densidad de corriente
E	Potencial
mV	Milivoltímetro
mA	Miliamperímetro
$\delta$	Densidad
R	Resistencia del circuito
SHE	Saturated Hydrogen Electrode
SCE	Saturated Calomel Electrode
ASTM	American Society for Testing and Materials
ppm.	Partes por millón
PS	Fuente de Corriente continua
LEMAT	Laboratorio de Ensayos de Materiales
V	Voltios
A	Amperios
Lt	Litros
ml	Mililitros
mm	Milimetro
B	Constante de Proporcionalidad
INOX	Inoxidable
Venh	Voltios de Electrodo Normal de Hidrogeno
PE	Peso Equivalente
N	Intercambio de Electrones

$i_{\text{corr}}$	Corriente de Corrosión
$V_{\text{corr}}$	Velocidad de Corrosión
CR	Rate Corrosion
A/cm <sup>2</sup>	Densidad de Corriente
g/equiv	Peso Equivalente Electroquímico
moles/(cm <sup>2</sup> .s)	Velocidad de Reacción Electroquímica
MPY	Mili-pulgada por año
AgCl	Cloruro de Plata
NaCl	Cloruro de Sodio
Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub>	Cloruro Mercurioso
HgSO <sub>4</sub>	Sulfato Mercurioso
CuSO <sub>4</sub>	Sulfato de Cobre



## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto permite el análisis de tasas de velocidad de corrosión en aceros comerciales, específicamente acero A42 e Inox 304. Este análisis permitirá determinar curvas de polarización de tipo potencioestáticas y galvanostáticas, exponiendo a los aceros a un medio conformado por agua al 3,5% de cloruro de sodio, empleando la técnica de Stern y Geary.

Para poder consolidar en su totalidad dicho proyecto, se debió diseñar y construir una celda electroquímica y a su vez un electrodo de Calomel, esto se lo debió hacer con elementos caseros, por razones de una difícil importación, aun así, para que la celda construida demuestre un fiable funcionamiento, se siguió un procedimiento basado y establecido en normas de la ASTM, tales como son las siguientes:

- ✓ ASTM G5-94 “Método estándar de referencia para mediciones potencioestáticas y potenciodinámicas de polarización anódica”
- ✓ ASTM G 102-89 “Práctica estándar para el cálculo de tasas de corrosión e información relacionada con mediciones electroquímicas”

La primera detalla el procedimiento para realizar correctamente las pruebas potencioestáticas y galvanostáticas, además de las partes que conforman la celda electroquímica, la segunda en cambio detalla el procedimiento y técnica para determinar correctamente la velocidad de corrosión de los análisis realizados.

Luego de haber obtenido los resultados, se procede a un análisis de los mismos, para así exponer las debidas conclusiones y recomendaciones sobre el tema en estudio.

# CAPÍTULO 1

## 1. CURVAS DE POLARIZACIÓN EN ACEROS SOMETIDOS A ENSAYOS ACELERADOS

En el presente capítulo se detallaran varios conceptos y teorías básicas sobre las distintas curvas de polarización.

Por teoría básica de corrosión, se sabe que para poder predecir la velocidad de corrosión de un sistema, se deben conocer las curvas de polarización (relaciones  $i$  vs  $E$ ) de cada una de la reacciones electroquímicas que lo componen, por lo que la determinación y estudio de las curvas de polarización es de fundamental importancia en los trabajos de corrosión. Las curvas de polarización pueden ser galvanostáticas o potencioestáticas.

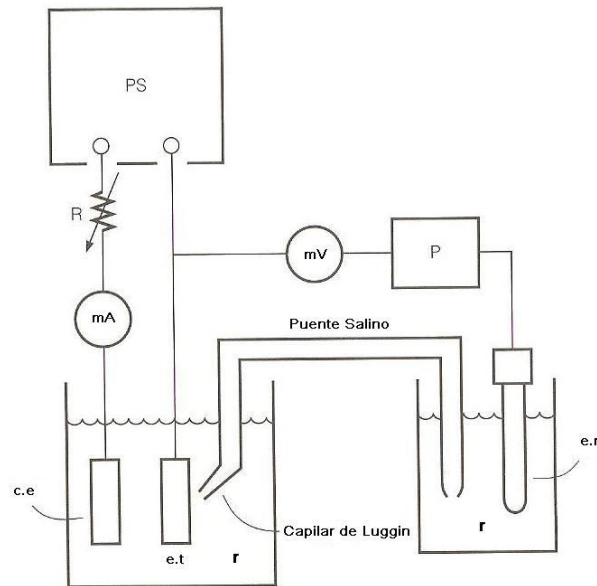
### 1.1 CURVAS GALVANOSTÁTICAS Y POTENCIOSTÁTICAS

#### CURVAS GALVANOSTATICAS

La primera curva de polarización que se analiza es la galvanostática, y se entiende que para determinar una curva de

este tipo, se lo hace aplicando una corriente constante y midiendo el potencial. Se repite este procedimiento para diferentes valores de corriente, midiendo en cada caso el nuevo potencial alcanzado.

Una forma sencilla del equipo para uso experimental en el trazado de curvas galvanostáticas, es el que se detalla mediante el esquema de la figura 1.1.



**Figura. 1.1: Circuito eléctrico utilizado en mediciones galvanostáticas. PS: fuente de corriente continua; R: resistencia del circuito; r: resistencia de la celda ( $R \gg r$ ); mV: milivoltímetro; mA: miliamperímetro; e.t.: electrodo de trabajo o probeta; c.e.: contraelectrodo; e.r.: electrodo de referencia. [“Principles and Prevention of Corrosion”, 2ª Edición, Pág. 98, 1996].**

La única condición requerida, es que la resistencia del circuito  $R$ , sea mucho mayor que la resistencia de la celda  $r$ . De este modo, se consigue que la corriente permanezca constante, independiente de los fenómenos que ocurren en la celda electroquímica.

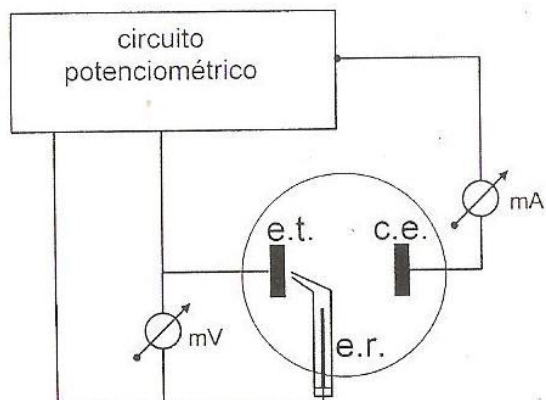
Es conveniente que el voltímetro que se use para medir el potencial, sea de gran impedancia de entrada, 10<sup>9</sup> ohmios o mayor, ya que de otro modo, la corriente que circula entre la probeta y el electrodo de referencia puede afectar las mediciones.

Si la probeta, muestra resistencia positiva en todo el ámbito de corrientes empleado, la curva galvanostática así obtenida es idéntica a una curva potencioestática. Sin embargo, si el sistema presenta un ámbito de resistencia negativa, como por ejemplo durante la pasivación, como se detalla en la figura 1.3, la curva galvanostática mostrará un salto en el potencial de la probeta, al superar el máximo de la densidad de corriente activa, por lo que se concluye, que las curvas galvanostáticas no sirven para estudiar sistemas pasivos, razón por la cual se prefieren las curvas potencioestáticas.

## **CURVAS POTENCIOSTÁTICAS**

Otro tipo de curva de polarización, es la determinada curva potencioestática, para obtenerlas se lo hace aplicando un potencial constante y determinando la forma en la que varia la corriente. Estas curvas potencioestáticas requieren un equipamiento más complejo que las anteriores, pero son las que encuentran mayor aplicación en los estudios de corrosión de metales.

Conservar una probeta a un potencial constante y 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 que tenga una velocidad de respuesta suficientemente grande. Estos circuitos, conocidos como potencioestatos, fueron desarrollados inicialmente por Hickling en 1942 y por Roberts en 1954, y el principio de su funcionamiento se describe esquemáticamente en la figura 1.2.

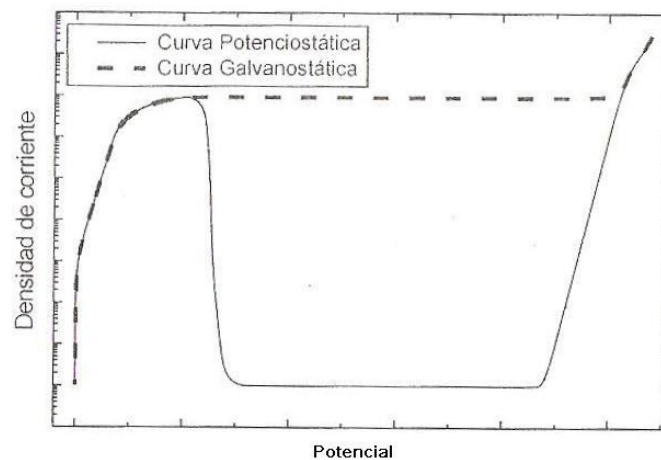


**Figura. 1.2: Descripción esquemática del funcionamiento de un potenciostato. e.t.: electrodo de trabajo o probeta; c.e.: contraelectrodo; e.r.: electrodo de referencia; mV: milivoltímetro; mA: miliamperímetro. [“Degradación de Materiales – Corrosión”, 3ª Edición, Pág. 89, 2006]**

Con el circuito potenciométrico, se fija el potencial deseado, entre el electrodo de trabajo (e.t.) y el electrodo de referencia (e.r.). Cualquier diferencia que surja, entre el potencial fijado y el potencial existente considerando el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia, es detectada como una señal de error por el controlador, que rápidamente ajusta la corriente entre el electrodo de trabajo (e.t.) y el contraelectrodo (c.e.), hasta que la señal de error se reduzca a cero.

La corriente medida en el instrumento, mA es igual a la que circula por la probeta, y se usa como medida de velocidad de corrosión del espécimen. La curva de polarización

potenciostática, se obtiene a partir de los valores de la corriente medidos en mA, para cada potencial. Algunos potenciostatos miden la corriente de corrosión sobre la conexión que termina en el electrodo de trabajo.



**Figura. 1.3: Comparación entre curvas de polarización galvanostática y potenciostática de un metal que presenta zona pasiva. [“Degradación de Materiales – Corrosión”, 3ª Edición, Pág. 89, 2006]**

## 1.2 EQUIPOS Y ACCESORIOS

En este punto se presenta y detalla de manera básica y fundamental, los equipos y accesorios utilizados en este proyecto.

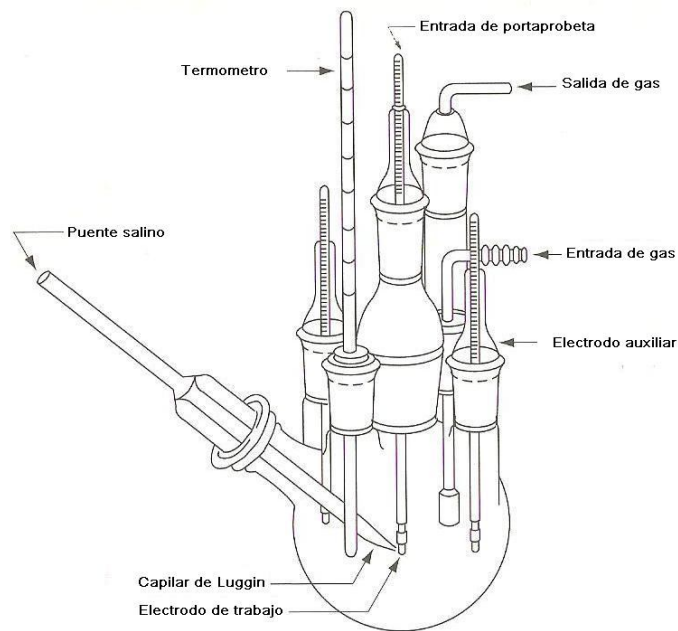
### Celdas

Se hace muy complicado el describir una celda específica para el estudio de la corrosión, puesto que cada problema presenta



distintas condiciones de análisis y deben tenerse en cuenta, diferentes factores tales como son la agitación del medio corrosivo, la temperatura, iluminación, ausencia de oxígeno, etc.

Como ejemplo, se detalla la celda usada originalmente en el laboratorio del LEMAT (Figura 1.4), usada para el trazado de curvas de polarización. La misma que está, totalmente construida en vidrio Pírex y permite trabajar a temperatura constante y con un permanente burbujeo de gas.



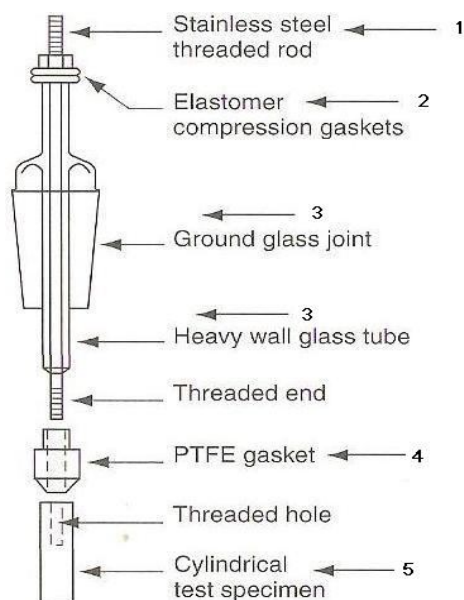
**Figura. 1.4: Representación esquemática de una celda de corrosión. [“Principles and Prevention of Corrosion”, 2<sup>a</sup> Edición, Pág. 102, 1996]**

Cuando se requiere estudiar el comportamiento de diferentes materiales, en un medio corrosivo particular (suelo, cemento, agua de mar, pozos petrolíferos, fluidos del cuerpo humano, etc.), la celda, deberá reproducir en el laboratorio, las mismas condiciones que se supone se presentarán en la práctica. Por otra parte, cuando se quiere estudiar el mecanismo de un proceso de corrosión en particular, es necesario que durante el experimento, se puedan controlar todas aquellas variables, que puedan tener algún efecto sobre el proceso de corrosión.

### **Probetas**

Para proceder a trazar una curva de polarización, es necesario conocer el área de la probeta expuesta al ambiente corrosivo o solución. Este hecho, así como la necesidad de evitar que los contactos eléctricos sean afectados por la solución corrosiva, hace que con frecuencia se deba pulir parte de la superficie de la probeta. El material usado para ello, no debe de introducir en el medio corrosivo, contaminantes que afecten el proceso de corrosión; de otro modo los resultados de las curvas de polarización tendrían poco significado.

Existen varios tipos de diseños, en lo concerniente a montaje de probetas, de manera que sea expuesta únicamente a la solución el área a ser analizada. Para este proyecto, se utilizará el montaje propuesto según Hoey y Cohen, y es el que se detalla en la figura 1.5.



**Figura. 1.5: Montaje de probetas según Hoey y Cohen. 1: Varilla roscada de metal; 2: tuerca de metal; 3: tubo de vidrio; 4: Arandela cónica de teflón; 5: Porta probeta de celoron. [“J. Electrochem. Soc.”, 2ª Edición, Pág. 245, 1958]**

### Equipos Auxiliares

Está claro que como equipos principales, utilizados para el trazado de curvas de polarización, está el de un potenciostato y el de un voltímetro electrónico, pero a la vez son necesarios otros equipos tales como:

- a. Amperímetros, los mismos que permiten medir corrientes, desde fracciones de microamperio para la zona pasiva, hasta cerca del amperio en la zona activa.
- b. Registradores, que permitan registrar las corrientes arriba indicadas, tanto en minutos como en días, dependiendo del estudio que se esté realizando.
- c. Sistemas adquiridores de datos, utilizados para el estudio de corrosión, en este caso, se utilizó el equipo auxiliar disponible en el laboratorio, y así se facilitó el almacenamiento de datos en el computador, para luego revisarlos y proceder con el estudio pertinente. En la figura 1.6 se detalla un conjunto de equipos principales y auxiliares, que fueron utilizados en este estudio.



**Figura. 1.6: Equipos utilizados durante el estudio**

### 1.3 MÉTODOS E INTERPRETACIÓN DE ANÁLISIS

En este punto se detallarán los distintos métodos e interpretación de análisis de las distintas curvas de polarización, para así emplearlos en el capítulo 3, donde son analizados los resultados obtenidos.

#### **Medición de Potencial**

Es conocido que, no existe forma de medir la diferencia de potencial en la interfase metal-solución, pero sí es posible, hacerlo frente a otra interfase que se la denomina electrodo de referencia. De este modo, tomando arbitrariamente el potencial del electrodo de referencia igual a cero, se tiene una escala de medición de potenciales metal-solución. El electrodo al cual se le ha asignado un potencial igual a cero, es el electrodo de hidrógeno.

Cabe recalcar que en la práctica, el uso del electrodo de hidrogeno resulta muy engorroso, por esta razón es común el usar otros electrodos de referencia, cuyo potencial respecto a dicho electrodo es bien conocido. A continuación se detalla en la tabla 1 una lista de los electrodos comúnmente utilizados, junto con el potencial de cada uno con respecto al electrodo estándar de hidrogeno.

**Tabla 1. Valores de potencial para electrodos de referencia, tomando como referencia al SHE.**

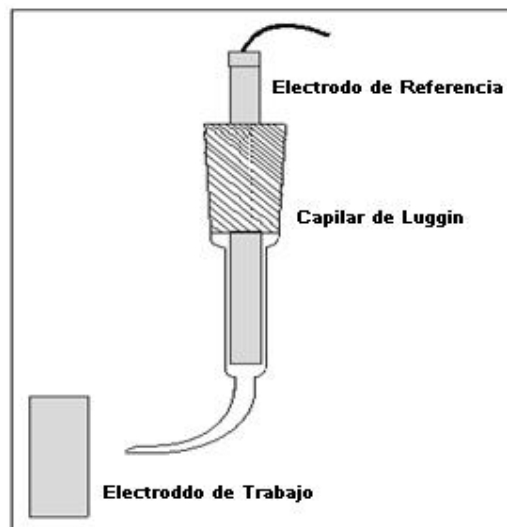
Electrodo	Reacción de Media Celda	Potencial
		V vs. SHE
Mercurio/Sulfato Mercurioso	$\text{HgSO}_4 + 2\text{e}^- = 2\text{Hg} + \text{SO}_4^{2-}$	+ 0.615
Cobre/Sulfato de Cobre	$\text{CuSO}_4 + 2\text{e}^- = \text{Cu} + \text{SO}_4^{2-}$	+ 0.318
Calomel Saturado (SCE)	$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- = 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	+ 0.241
Plata/Cloruro de Plata	$\text{AgCl} + \text{e}^- = \text{Ag} + \text{Cl}^-$	+ 0.222
Hidrogeno Estándar (SHE)	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- = \text{H}_2$	0.000

En los trabajos o análisis de corrosión como el que se está evaluando, un electrodo de referencia muy usado por su robustez, facilidad de trabajo, tamaño reducido, y facilidad de construcción, es el electrodo de Calomel. Es quizás un electrodo poco adecuado para mediciones electroquímicas muy precisas, pero en trabajos de corrosión, donde la precisión de las medidas no suele ser mayor de  $\pm 10\text{mV}$ , ha tenido una gran aceptación.

### **El Capilar de Luggin**

Durante el estudio de celdas electroquímicas, el potencial que se interesa medir en un proceso de corrosión, es el de la interfase metal-solución. Se debe tener en cuenta que debido a la resistencia de la solución, mientras mayor sea la distancia de separación de la superficie del electrodo, existirá una mayor caída óhmica del potencial.

Al trazar las curvas de polarización, la medición del potencial debe hacerse eliminando, toda posible contribución óhmica de la solución; una forma de de reducir a un mínimo la caída óhmica, es midiendo el potencial en un punto cercano a la superficie del electrodo. Esto puede lograrse a través de un tubo capilar (Capilar de Luggin) colocado cerca de la superficie del electrodo. La conveniencia de usar un capilar, se justifica, ya que así se reduce la interferencia en la distribución de corriente sobre la probeta, pese a realizar las mediciones muy cerca de la superficie metálica. En la figura 1.7 se detalla el Capilar de Luggin que se utilizara en el desarrollo de este proyecto.



**Figura. 1.7: Capilar de Luggin**

### **Desaireado de las soluciones**

En los procesos de corrosión, es común encontrar varias reacciones actuando simultáneamente sobre el electrodo, por esta razón, en el trazado de una curva de polarización anódica, es posible encontrar interferencias de reacciones catódicas que ocurren al mismo potencial. El trazado de las curvas de polarización, se simplifica apreciablemente, si es posible eliminar tales reacciones catódicas.

Una reacción muy frecuente, en el ámbito de potenciales más usados en corrosión electroquímica, es la reducción del oxígeno presente en la solución. La solubilidad del oxígeno en agua es relativamente baja. El agua en equilibrio con aire, a temperatura ambiente, contiene del orden de 8 a 9 ppm de oxígeno. La corriente límite catódica para esta concentración de oxígeno, es del orden de  $3 \times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup>. Esta corriente catódica puede ocultar, la mayoría de las reacciones anódicas presentes en los metales en estado pasivo, donde la corriente a medir, oscila entre  $10^{-5}$  y  $10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup>.

Científicos realizaron un estudio crítico, de los diferentes métodos conocidos para desairear soluciones acuosas. Encontraron que el método más eficiente, es burbujear en la solución, nitrógeno previamente purificado. Usando el sistema de purificación descrito por



dichos científicos, se obtuvo luego de una hora de desaireado, concentraciones de oxígeno del orden de 0,0005 ppm. La corriente límite catódica, para tales concentraciones, es del orden de  $10^{-9}$  A/cm<sup>2</sup>, por lo que es prácticamente despreciable su aporte a la medida de corriente total.

### **Método Potenciostático vs. Potenciocinético**

En las curvas de polarización, aparte del potencial y la corriente, hay una tercera variable muy importante que no aparece en forma explícita, y es el tiempo. Al trazar una curva de polarización se observa, que la corriente a medir varía con el tiempo. Esta variación es particularmente notable en las zonas de pasividad.

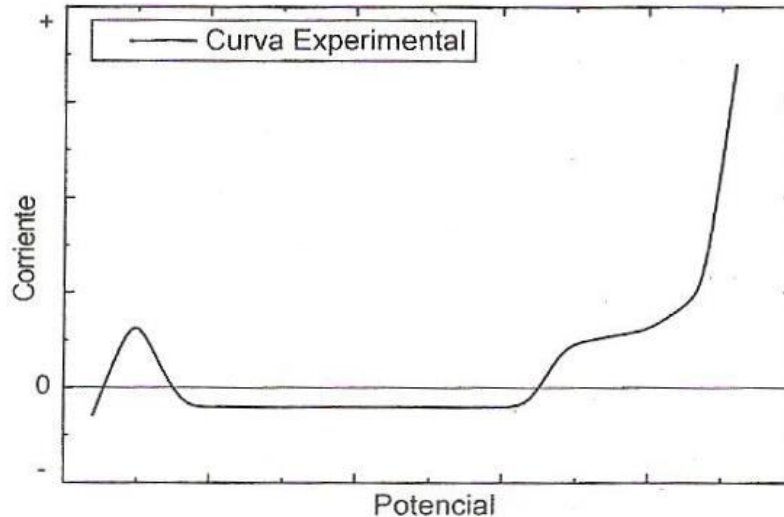
El trazado de curvas de polarización con control de potencial, suele hacerse de dos maneras: potenciostática o potenciocinéticamente. Una curva potenciostática se obtiene midiendo la corriente, luego que ésta haya alcanzado para cada potencial un valor estacionario. La otra forma de trazado de curvas de polarización, es la potenciocinética que a su vez puede hacerse de dos maneras:

- a) Variando el potencial en escalones de igual valor y esperando siempre el mismo tiempo antes de leer la corriente,

- b) Variando el potencial a una velocidad constante y registrando simultáneamente la variación de la corriente.

### Interpretación de las curvas de polarización

Como se dijo anteriormente, sobre una probeta en corrosión tienen lugar en general varias reacciones simultáneas. La curva de mayor interés es la de disolución anódica del metal en estudio, buscando el trazado de la misma, eliminando las otras reacciones que interfieren. Las primeras curvas de polarización trazadas en acero inoxidable, en ácido sulfúrico sin desairear, presentaban la forma que se ve en la figura 1.8.



**Figura. 1.8: Apariencia de las primeras curvas de polarización trazadas con aceros inoxidables en soluciones aireadas de ácido sulfúrico. [“Degradación de Materiales - Corrosión”, 3ª Edición, Pág. 103, 2006]**

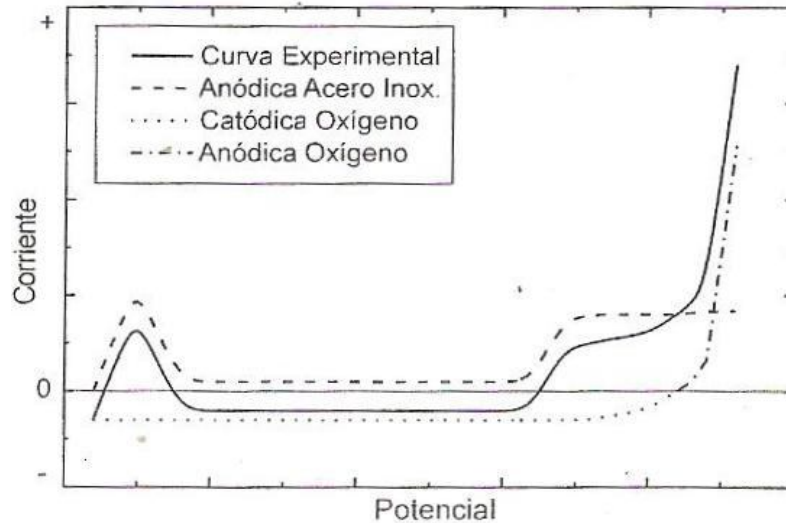
Un estudio más cuidadoso de las mismas, se detalla en la figura 1.9, el mismo que demuestra que las curvas estaban compuestas por la suma de:

- I. La curva anódica de disolución del acero,
- II. La curva catódica de reducción del oxígeno, y
- III. La curva anódica de desprendimiento de oxígeno.

Mediante un desaireado del ácido sulfúrico, es posible eliminar la reacción catódica de reducción del oxígeno, quedando así expuestas las zonas activa y pasiva del acero inoxidable sin interferencias.

El estudio de curvas de polarización anódica, supone que la densidad de corriente, dá una medida de la velocidad de corrosión del metal. Esto establece que no ocurren otras reacciones simultáneamente y que la eficiencia de la electrólisis es 100%.

En caso de dudas, esta eficiencia puede determinarse comparando la densidad de corriente medida, con la velocidad de pérdida de peso del metal, o, con la variación de la concentración de iones metálicos en la solución.



**Figura. 1.9: Relaciones parciales que componen la curva de polarización de la Fig. 1.8. Se observa que la curva de la figura anterior es la suma de la reacción anódica del acero inoxidable, la reacción catódica del oxígeno presente en la solución y la reacción anódica de desprendimiento de oxígeno. [“Degradación de Materiales - Corrosión”, 3ª Edición, Pág. 103, 2006]**

### Densidad de corriente y velocidad de corrosión

Está claro, que existe una relación entre la velocidad a la cual transcurre una reacción electroquímica ( $r$ ) y la densidad de corriente involucrada ( $i$ ):

$$r = \frac{i}{n \cdot F} \quad [1.1]$$

Donde si  $i$  está expresado en  $A/cm^2$ ,  $F$  en  $Coul/equiv$  y  $n$  en  $equiv/mol$ , la velocidad de la reacción electroquímica ( $r$ ), estará dada en  $moles/(cm^2 \cdot s)$ .

Esta velocidad de reacción, puede ser transformada en velocidad de corrosión ( $w$ ) o de pérdida de peso (en términos de masa disuelta por unidad de área expuesta al electrolito y por unidad de tiempo), multiplicándola por la masa atómica ( $A$ ) del elemento en cuestión:

$$w \left( \frac{g}{cm^2 \cdot s} \right) = \frac{i \left( \frac{A}{cm^2} \right) * A \left( \frac{g}{mol} \right)}{F \left( \frac{coul}{equiv} \right) * n \left( \frac{equiv}{mol} \right)} \quad [1.2]$$

En electroquímica, al cociente  $A/n$  se lo denomina Peso equivalente electroquímico (PE) del elemento y tiene unidades de g/equiv. Cuando se trata de una aleación, el Peso equivalente electroquímico de la misma se calcula como:

$$PE = \sum \frac{f_i * A_i}{n_i} \quad [1.3]$$

Donde  $f_i$ ,  $A_i$  y  $n_i$  son la fracción atómica en la aleación, la masa atómica y el número de electrones intercambiados de cada elemento  $i$  de la ecuación.

Así, la ecuación [1.3] se transforma en:

$$w = \frac{i * PE}{F} \quad [1.4]$$

Cuando se desea transformar la velocidad de pérdida de peso por unidad de área, en términos de velocidad lineal del ataque corrosivo

(en longitud por unidad de tiempo), a la expresión [1.4] se la divide por la densidad ( $\delta$ ) del elemento o la aleación en cuestión:

$$v \left( \frac{cm.g}{s} \right) = \frac{i \left( \frac{A}{cm^2} \right) * A \left( \frac{g}{mol} \right)}{F \left( \frac{coul}{equiv} \right) * n \left( \frac{equiv}{mol} \right) * \delta \left( \frac{g}{cm^3} \right)} \quad [1.5]$$

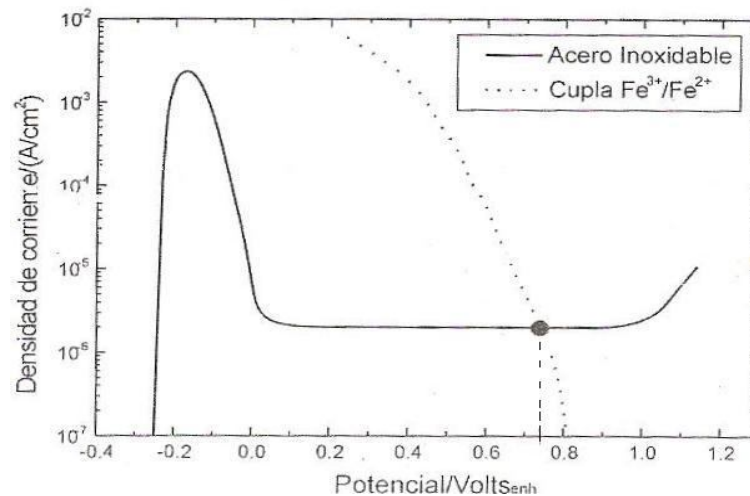
#### 1.4 APLICACIONES

Luego de enunciar los métodos e interpretación de análisis, se procede a detallar las distintas aplicaciones de los distintos estudios de corrosión.

##### **Estudio de mecanismos de corrosión**

Si se conoce la curva de polarización anódica de un metal, en un determinado medio, aplicando los diagramas de Evans es posible, predecir el comportamiento de dicho metal en presencia de diferentes oxidantes. Científicos durante un estudio, realizaron el trazado de la curva de polarización de un acero inoxidable (Fe-18%Cr-5%Ni-8%Mn), en ácido sulfúrico 1N. Superponiendo a dicha curva anódica, las curvas catódicas de diversos oxidantes, medidas sobre el acero inoxidable pasivado, pudieron predecir el comportamiento de dicho acero, en presencia de tales oxidantes. La figura 1.10, muestra el diagrama de Evans del acero inoxidable en ácido sulfúrico 1N, conteniendo sulfato férrico 0,25M y sulfato ferroso 0,0025M. El

diagrama indica, que el potencial de corrosión para este sistema, es de  $0,770 V_{\text{enh}}$ . Por lo tanto una probeta de acero inoxidable activo, sumergida en esta solución, se pasiva rápidamente y alcanza efectivamente el potencial de  $0,770 V_{\text{enh}}$ .



**Figura. 1.10: Curva de polarización anódica de un acero inoxidable (Fe–18%Cr–5%Ni–8%Mn) en ácido sulfúrico 1N. Se muestra superpuesta la curva de polarización catódica de una solución ferroso-férrica. El acero, en presencia de dicha solución, se pasiva a  $0,770 V_{\text{enh}}$ . [“Degradación de Materiales - Corrosión”, 3ª Edición, Pág. 107, 2006]**

### Selección de materiales

Dado un medio corrosivo cualquiera, es posible, mediante comparación de curvas de polarización anódica, determinar qué material presentará mayor resistencia, a la corrosión en dicho medio.

También pueden usarse las curvas de polarización, para seleccionar diferentes métodos de acabado de materiales. En un estudio se

usaron curvas de polarización anódica, para evaluar el efecto, de tratamientos superficiales sobre la corrosión de amalgamas dentales en saliva artificial, cuando se recurrió al trazado de curvas de polarización, al seleccionar aleaciones resistentes para implantes en cuerpo humano; mientras que Duffó las empleo para seleccionar aleaciones para prótesis dentales.

### **Evaluación de la agresividad del medio**

Comparando las curvas de polarización anódica, de un mismo metal en diferentes medios, es posible comparar las agresividades relativas de los mismos. Por ejemplo, resulta que para los aceros inoxidable, la agresividad de los ácidos orgánicos en orden decreciente, es la siguiente:

**ácido fórmico > ácido acético > ácido láctico > ácido cítrico**

Otro ejemplo de aplicación, es el desarrollo de un método de medida "in situ" de la agresividad de suelos y aguas, basado en el trazado de curvas de polarización.

### **Resistencia a la polarización**

El método electroquímico de resistencia a la polarización o polarización lineal, ha sido utilizado por años para medir, las velocidades de corrosión, generalmente la encontramos expresada en



mili-pulgadas por año (MPY). Estas mediciones por resistencia a la polarización, se pueden realizar rápidamente, normalmente se obtendrán resultados en menos de diez minutos.

Los primeros investigadores, observaron que experimentando con el grado de polarización, en una determinada corriente aplicada, fue mayor a una velocidad de corrosión. Además una aparente linealidad se observó 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.

## **CAPÍTULO 2**

### **2 DISEÑO Y MONTAJE DE UNA CELDA ELECTROQUÍMICA PARA ENSAYOS CINÉTICOS DE CORROSIÓN**

Con la introducción a las curvas de polarización y sus métodos de análisis e interpretación, a continuación se detallarán los materiales, reactivos, accesorios y equipos que se utilizó en el diseño y montaje de la celda electroquímica y su respectivo electrodo de referencia, tales diseños fueron basados en las referencias bibliográficas detalladas en el capítulo anterior, acopladas a ideas propias del autor de este proyecto de grado, esto se lo realizó mediante la presentación de una cronología fotográfica, lo que condujo al final, para presentar los resultados obtenidos, los mismos que constan en tablas y gráficos representativos, para luego ser analizados en el capítulo 3.

## 2.1 Descripción de Materiales y reactivos.

Luego de ser revisados varios textos y páginas de internet, esto dió un resultado positivo, ya que se obtuvo una clara idea, de cómo debería ser diseñada y ensamblada la celda de corrosión y su respectivo electrodo de referencia. A continuación se detalla los materiales y reactivos que fueron utilizados en dicho proyecto:

- ✓ Cloruro de Potasio.- El compuesto químico cloruro de potasio (KCl), es un haluro metálico compuesto de potasio y cloro. En su estado puro es inodoro. El cloruro de potasio, es utilizado en medicina, aplicaciones científicas, procesamiento de alimentos y en ejecución legal por medio de inyección letal. Es un compuesto inorgánico.



**Figura 2.1. Cloruro de Potasio**

- ✓ Cloruro de Potasio Solución Acuosa.- Para la formación de esta solución, se utilizó el reactivo cloruro de potasio, que mezclándolo con agua destilada en una molaridad de 4M, se logra obtener una solución acuosa, de cloruro de potasio saturado.



**Figura 2.2. Cloruro de Potasio (Solución Acuosa)**

- ✓ Mercurio Líquido.- Es un metal pesado plateado, que a temperatura ambiente es un líquido inodoro. Es mal conductor del calor comparado con otros metales, aunque no es mal conductor de la electricidad. Se alea fácilmente con muchos otros metales, como el oro o la plata, produciendo amalgamas.

Es insoluble en agua y soluble en ácido nítrico. Cuando aumenta su temperatura produce vapores tóxicos y corrosivos, más pesados que el aire.



**Figura 2.3. Mercurio**

- ✓ Cloruro Mercurioso.- Este reactivo también llamado calomel o cloruro de mercurio (I), es un compuesto inorgánico de fórmula  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ . El nombre calomelanos, parece provenir del griego καλος (bello) y μέλας, -ανος, (negro). Este nombre (algo sorprendente para un compuesto blanco) probablemente se deba a la reacción de dismutación con el amoníaco, en la que se forma una coloración negra (a causa de un polímero nitrogenado de mercurio (II) y mercurio elemental).



**Figura 2.4. Cloruro Mercurioso**

- ✓ Varilla de Platino.- Se trata de un metal de transición blanco grisáceo, precioso, pesado, maleable y dúctil. Es resistente a la corrosión y se encuentra en distintos minerales, frecuentemente junto con níquel y cobre; también se puede encontrar como metal. Se emplea en joyería, equipamiento de laboratorio, contactos eléctricos, empastes y catalizadores de automóviles.



**Figura 2.5. Varilla de Platino Quirúrgico**

- ✓ Varilla de Acero (ASTM A42).- El acero es una aleación de hierro y carbono, donde el carbono no supera el 2,1% en peso de la composición de la aleación, alcanzando normalmente porcentajes entre el 0,2% y el 0,3%. Porcentajes mayores que el 2,0% de carbono dan lugar a las fundiciones, aleaciones que al ser quebradizas y no poderse forjar, se moldean.

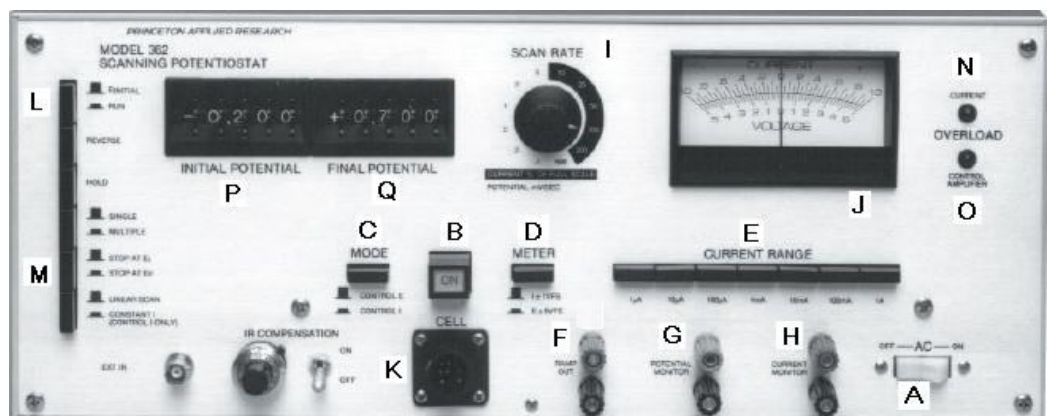


**Figura 2.6. Varilla Acero ASTM A42**

## **2.2. Equipos y accesorios necesarios.**

Además de materiales y reactivos, cabe indicar, que para la realización de este proyecto, fueron necesarios equipos y accesorios de uso exclusivo, para este tipo de estudios. Los cuales se los detalla a continuación:

- ✓ **Potenciostato.-** Un potenciostato es un instrumento electrónico que controla la diferencia de potencial entre un electrodo de trabajo y un electrodo de referencia. Ambos electrodos se colocan dentro de una celda electroquímica. El control de la corriente que pasa por el electrodo de trabajo se completa con la introducción de un electrodo auxiliar o contraelectrodo.



**Figura 2.7. Potenciostato**

A continuación se detalla las principales funciones del potenciostato-galvanostato:

**A:** Potencial Inicial: Ajustable por medio de perilla desde  $\pm 9,999$  V hasta  $\pm 0,001$  V y una precisión de  $\pm 3$  mV.

**B:** Potencial Final: Al escanear, establece el potencial final o actual.

**C:** E<sub>INITIAL</sub> / RUN: Este pulsador acciona el potencial de inicio o a su vez el inicio del potencial de barrido, y en modo inverso hace lo mismo pero con corriente.

**G:**  $I_E$  / STOP en  $E_F$ : Este pulsador determina el potencial final o actual donde un ciclo terminará su barrido.

**J:** MODE: Pulsador, que determina si se mantiene el control de potencial o el control actual.

**K:** CELL: Pulsador que controla la aplicación de los potenciales actuales en la celda exterior.

**L:** MEDIDOR: Pulsador, que determina si el techo de trabajo actual o potencial de electrodo se muestra en el medidor.

**M:** VELOCIDAD / ACTUAL% DE ESCALA: Establece modos de escaneo lineales en tasas de barrido.

**N:** RANGO DE CORRIENTE: Desde 1uA hasta 1A en secuencias de décadas.

**O:** MEDIDOR: Permite la lectura cómoda de la célula de trabajo actual o a su vez del potencial del electrodo.

**Q:** Conexión externa CELL CABLE

**R:** RAMP OUT: Proporciona una tensión de salida que es análoga a la rampa lineal en el modo de exploración, la salida es independiente de la primera configuración actual o potencial inicial.

**S:** POTENCIAL MONITOR: Proporciona una tensión equivalente al potencial de referencia del electrodo, con respecto al potencial del electrodo de trabajo.



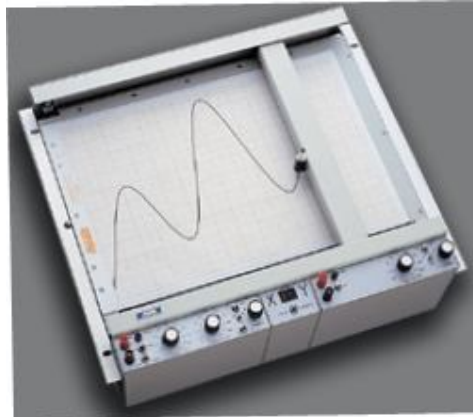
**T:** Actual del monitor: Entrega una salida que es proporcional a la celda actual.

**U:** ACTUAL DE SOBRECARGA: Indica si la celda es superior a dos veces el rango actual seleccionado.

**V:** POTENCIAL DE SOBRECARGA: Indica una situación de cumplimiento en exceso de voltaje de  $\pm 30$  V.

**W:** AC. Encendido / Apagado

- ✓ **Graficador XY.-** Este instrumento consiste de unos trazadores, que imprimen su salida moviendo una pluma sobre la superficie de un pedazo de papel. Pueden dibujar trazos complejos pero de manera muy lenta debido al movimiento mecánico de las plumas. Suelen tener un tambor con diferentes plumillas, para poder cambiar la anchura y el color de los trazos, El movimiento de la pluma se realiza mediante dos motores paso a paso: eje X y eje Y. El del eje X mueve las plumillas a lo ancho del papel, mientras que el del eje Y puede adoptar dos variaciones.



**Figura 2.8. Graficador XY**

- ✓ **Computador.-** El computador nos es de gran ayuda para poder procesar todos los datos obtenidos del estudio, mediante el programa LabVIEW, que es el encargado de mostrarnos las gráficas que se generen.



**Figura 2.9. Computador**

- ✓ **Tarjeta de Adquisición de Datos.-** La adquisición de datos o adquisición de señales, consiste en la toma de muestras del mundo

real (sistema analógico), para generar datos que puedan ser manipulados, por un ordenador u otras electrónicas (sistema digital). Consiste, en tomar un conjunto de señales físicas, convertirlas en tensiones eléctricas y digitalizarlas de manera que se puedan procesar en una computadora o PAC. Se requiere una etapa de acondicionamiento, que adecua la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la transformación a señal digital. El elemento que hace dicha transformación, es el módulo de digitalización o tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).



**Figura 2.10. Tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ)**

- ✓ **Electrodo de Referencia.-** En muchas aplicaciones, es deseable que el potencial de media celda de uno de los electrodos, sea conocido, constante y completamente insensible a la composición de la solución en estudio. Un electrodo con estas características, se denomina electrodo de referencia. Un electrodo de referencia debe ser fácil de

montar, proporcionar potenciales reproducibles y tener un potencial sin cambios, con el paso de pequeñas corrientes. Dos electrodos comúnmente utilizados que satisfacen estos requisitos son el Electrodo de Calomel y el Electrodo de Plata-Cloruro de Plata.



**Figura 2.11. Electrodo Elaborado y Electrodo Comercial de Calomel**

### **2.3. Proceso y Construcción de Celda Electroquímica.**

En este punto se detalla cada uno de los materiales que se utilizó y el porqué, en la construcción de la celda electroquímica de este proyecto, junto con el proceso de diseño y montaje, se detalla tales materiales y una breve descripción de ellos:

- ✓ Envase de vidrio (1000ml).- Se utilizó un envase de vidrio pírax, por su alta resistencia, y además por ser fácil de adquirir.

- ✓ Electrodo de trabajo.- Es el electrodo que está siendo investigado; no se trata de un ánodo, también se puede investigar su comportamiento catódico.
  
- ✓ Electrodo auxiliares.- O también conocidos como contraelectrodos, permiten el paso de la corriente, a través de la interfase que se investiga; se utilizan materiales no contaminantes: carbón, titanio, aceros inoxidable, etc.
  
- ✓ Embudo de separación (60mL).- Este material de laboratorio se lo uso con la firme convicción, de que por medio de la llave de flujo y una membrana porosa, nos permita controlar el flujo de cloruro de potasio saturado, para de esta manera mantener un circuito cerrado continuo por medio del capilar de Luggin.
  
- ✓ Tubos de ensayo.- Los tubos de ensayo fueron utilizados como parte de la construcción de los distintos electrodos de referencia, se utilizaron tubos de dos dimensiones (12x72) y (15x150).

- ✓ Electrodo de referencia.- El detalle del diseño y construcción del electrodo de referencia se lo detalla más adelante, ya que fue un proceso muy engorroso y a la vez muy interesante.
  
- ✓ Tapa de teflón.- La tapa de la celda de corrosión fue diseñada de teflón, el mismo, que nos brinda muchas facilidades y a su vez ventajas, por su fácil operación en el montaje de los demás accesorios de la celda.
  
- ✓ Porta probetas de teflón.- El lugar donde se encuentra o coloca las probetas, a analizarse, toma el nombre de portaprobetas, el cual a su vez fue diseñado del mismo material de la tapa de la celda (teflón), el mismo que fue utilizado por su resistencia y a la vez fácil manejabilidad.

Luego de la descripción de cada uno de los materiales, el siguiente paso es detallar, el proceso de diseño y montaje de la celda de corrosión, esto se lo hará mediante una cronología fotográfica y detallando lo que se está desarrollando:

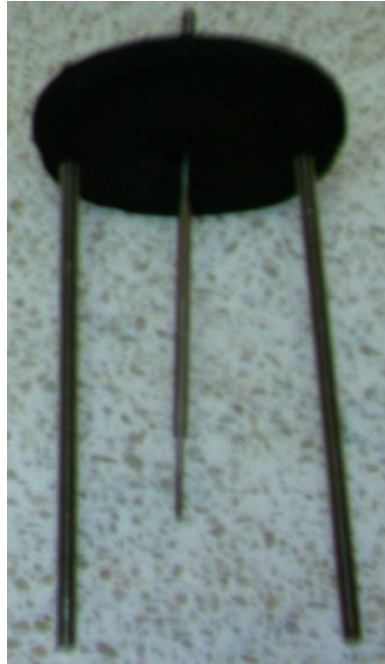
1. Recipiente de vidrio



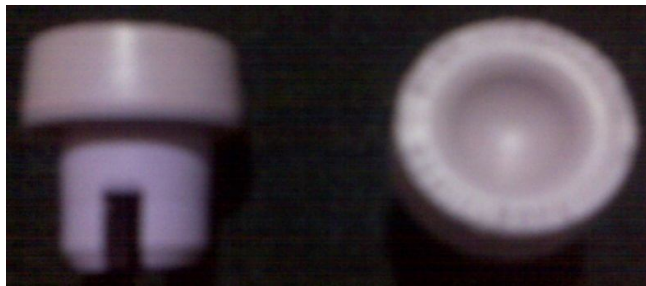
2. Dimensionamiento de tapa de la celda



3. Posicionamiento de electrodos en la tapa



4. Tapones de caucho para fácil aseguramiento de electrodos





5. Colocación y aseguramiento de electrodos y el tubo de vidrio en la tapa en la tapa



6. Ensamblaje total de la celda



## 7. Puesta en funcionamiento y pruebas de la celda



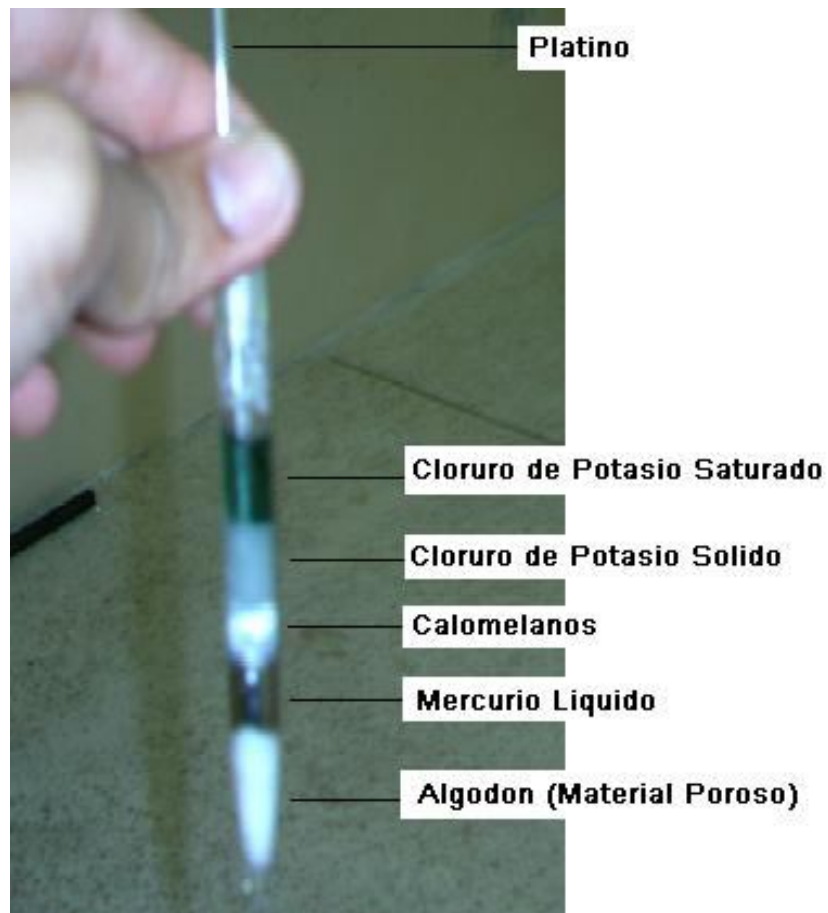
### 2.4. Proceso y Construcción de Electrodo de Referencia de Calomel.

Como factor primordial del proyecto, cabe anotar que un gran problema resulto la importación de un electrodo de referencia, debido a normas de seguridad y salud, esto conllevó a un problema mucho más grande, que fué la construcción de un electrodo de referencia de Calomel saturado, de una manera casera, pero que a su vez cumpla con una funcionalidad exigida por normas, resulto complicado pero el

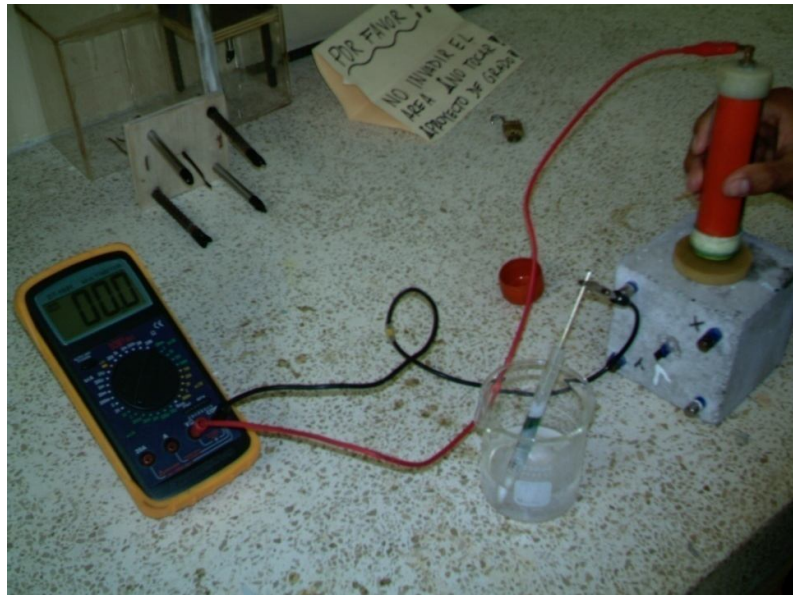
resultado fue que luego de tres meses y medio, se logró lo planteado al inicio del proyecto.

A continuación, se presenta una serie de fotografías, que detallan la construcción de varios modelos de electrodos, desde el inicio hasta el definitivo que fue el que cumplió con todo los requisitos, tanto técnicos como estéticos.

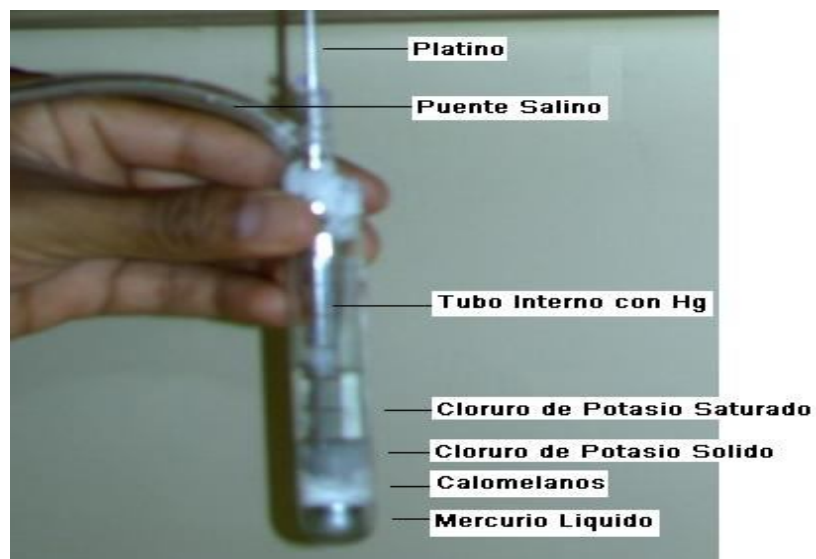
#### 1. Electrodo de Referencia Modelo A (ER – A)



2. Pruebas realizadas con el ER-A nos dieron resultados negativos ya que no se obtenía medida de potencial alguna.



3. Electrodo de Referencia Modelo B (ER – B).



A este modelo se le agregó un puente salino, para la adecuada transmisión de iones.

4. Al realizar pruebas con el ER-B, ya se obtuvieron medidas de potencial, pero no eran las adecuadas, así que se procedió a rediseñar.



5. Electrodo de Referencia Modelo C (ER – C)

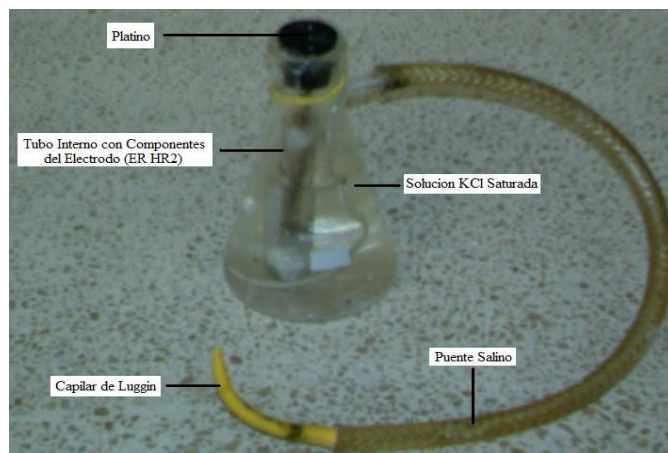


En este modelo se lo rediseñó totalmente, pero manteniendo la misma estructura interna de elementos.

6. Al realizar varias pruebas con este prototipo el ER – C, ya se obtuvo resultados más cercanos a la realidad del estudio, pero aun no se lograba una estabilidad permanente.

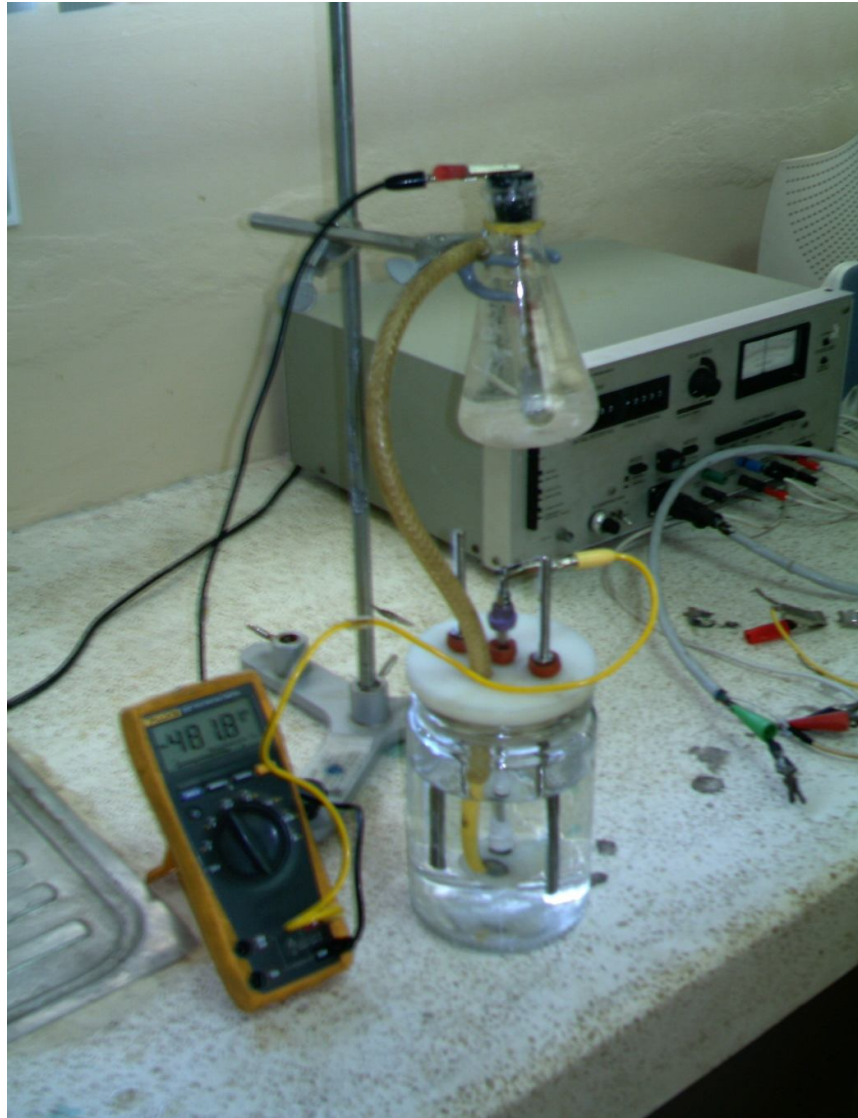


7. Electrodo de Referencia Modelo D (ER – D)

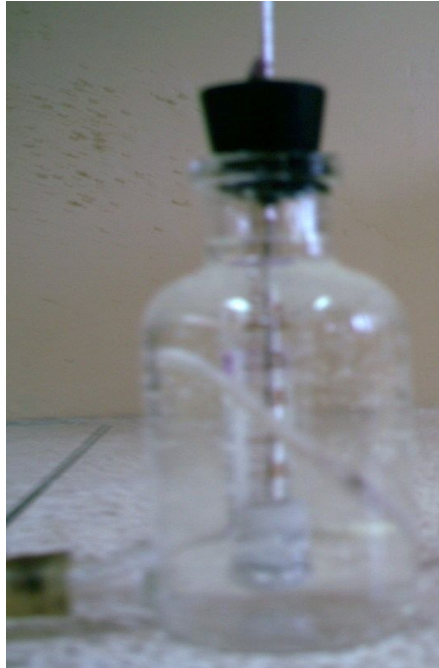


Este modelo presenta un cambio y es el de la colocación de un accesorio, para que realice la función de capilar de Luggin.

8. Los datos que se obtuvieron luego de varias pruebas con este modelo, fueron más estables, pero aún no, al nivel que se deseaba, al menos se centró la necesidad de la mejora, en el capilar a colocar.



### 9. Electrodo de Referencia E (ER – E)



El cambio realizado en este modelo, fue por comodidad con los análisis, ya que el puente salino, ya no sale desde la parte superior, sino inferior y esto facilita las pruebas.

10. Los ensayos realizados con este modelo dieron resultados válidos y a la vez estables, esto se logró, debido a que se obtuvo el capilar de Luggin adecuado para estos tipos de análisis.





11. Para certificar el correcto funcionamiento del electrodo diseñado y construido, se realizó pruebas comparativas con respecto al electrodo de Plata/Cloruro de Plata ( $\text{Ag}/\text{AgCl}$ ). En la foto A se observa, la medición del electrodo de Calomel con respecto a la varilla de acero A42 (Material a ser analizado), para luego en la foto B realizar lo mismo, pero esta vez colocando un electrodo de plata/cloruro de plata vs el acero A42.

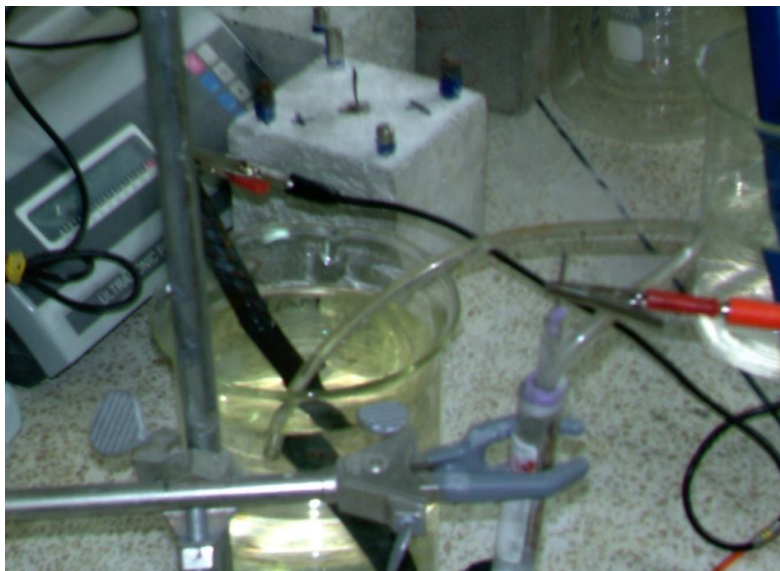


Foto A

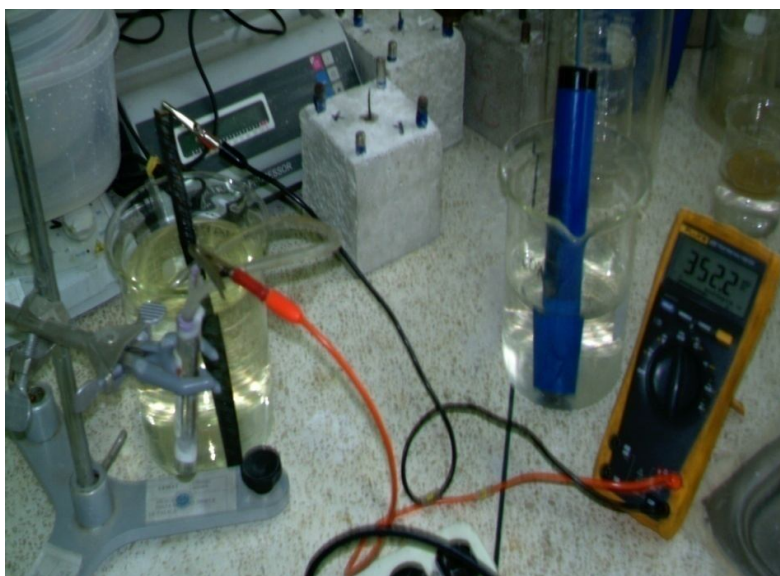


Foto B

## 12. Electrodo de Referencia F (ER – F)



A pesar de que el modelo anterior, presentaba un correcto funcionamiento, se lo rediseño por estética y facilidad de trabajo con el mismo, las dimensiones del mismo son de 20 x 5 cm.

13. Ensayos realizados con el ER – F, junto con la celda y el capilar de Luggin original.



**2.5. Ensayo y Pruebas a realizar según Norma ASTM G5–94 “Método estándar de referencia para mediciones potencioestáticas y potenciodinámicas de polarización directa”.**

Para realizar un estudio experimental, de mediciones potencioestáticas y potenciodinámicas, lo mejor es acudir a la norma ASTM G 5–94 "Método estándar de referencia, para mediciones potencioestáticas y potenciodinámicas de polarización anódica".

Los pasos a seguir de acuerdo con la norma son los siguientes:

1. Preparar 1 Lt de ClNa al 3,5%, para esto se procedió a colocar 36 gr de ClNa en 1 Lt de agua destilada, esta solución se colocará en la célula de cristal.
2. Colocar los electrodos auxiliares, el puente salino (Capilar de Luggin), y los componentes necesarios para completar la celda de ensayos, y luego cerrarla para no obtener derramamientos o escapes de gas no permitidos. Una vez cerrada llenar el puente salino.
3. Mantener, la temperatura de la celda electroquímica a 30°C, en caso de necesitar controlar la temperatura, esto se lo hará por otros medios convenientes.
4. Reducir los niveles de oxígeno en la solución, antes de la inmersión de la muestra de ensayo, esto puede lograrse por

inyección de un gas, libre de oxígeno, como el hidrogeno, argón o nitrógeno, a una tasa de  $\text{cm}^3/\text{min}$  por un periodo mínimo de 1 a 2 horas.

5. Preparar la superficie del electrodo de trabajo, esto se lo hará utilizando, lijas numero 180, 220, 320, 400 y 600, mediante este orden, hasta que se eliminen rayas gruesas y cualquier imperfección en la superficie.
6. Determinar la superficie de la probeta, esto se lo consigue estableciendo sus dimensiones, con una precisión de 0,01 mm.
7. Realizar el montaje de los electrodos y componentes como se describe en la figura 1.1. Ajustar todos los componentes para no generar mediciones erróneas o perdidas de reactivos.
8. Desengrasar la muestra justo antes de la inmersión y luego enjuague con agua destilada.
9. Usar un puente salino (Capilar de Luggin) que acerque el electrodo de referencia a 2 o 3 mm de la superficie del electrodo de trabajo.
10. Registrar el potencial en circuito abierto, luego de 50 minutos de inmersión de la muestra a ensayar.
11. Iniciar el barrido de potencial 1 hora después de la inmersión de la muestra, proceder a través de  $\pm 1,60$  V vs el electrodo de Calomel saturado (SCE).

12. Obtener los datos de voltaje y corriente generados durante el ensayo.

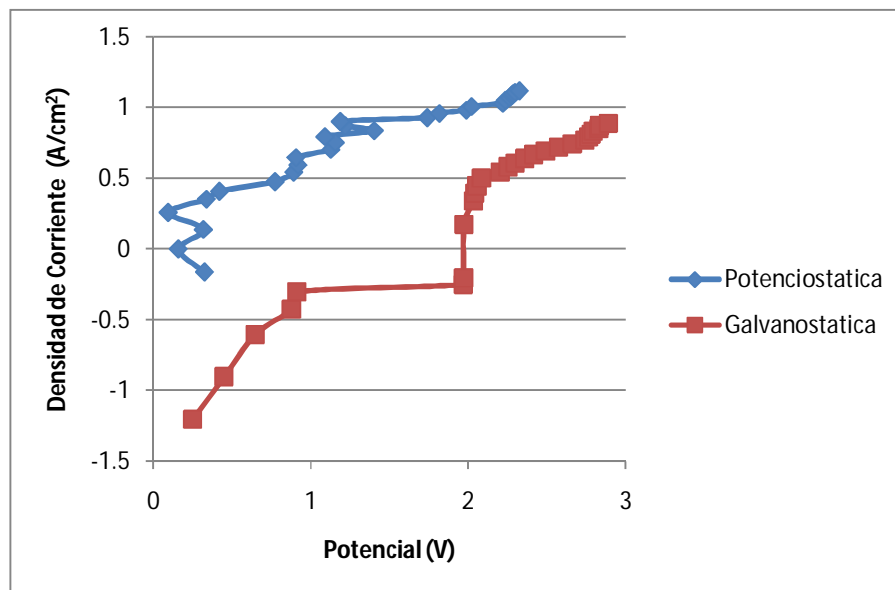
13. Graficar la curva de polarización.

A continuación se detallan los resultados generados durante el estudio, mediante la exposición de tablas, para luego en el siguiente capítulo graficar y analizar cada uno de los resultados.

**Tabla 2. Datos del acero ASTM 42 sin inyección de oxígeno**

<b>A42 Potenciostática Sin O2</b>			<b>A42 Galvanostática Sin O2</b>		
<b>P (V)</b>	<b>I (A)</b>	<b>i (A/cm2)</b>	<b>P (V)</b>	<b>I (A)</b>	<b>i (A/cm2)</b>
0,325	0,011	-0,164	0,251	-0,001	-1,206
0,158	0,016	-0,001	0,448	0,002	-0,905
0,318	0,022	0,137	0,648	0,004	-0,603
0,094	0,029	0,257	0,877	0,006	-0,427
0,337	0,036	0,351	0,912	0,008	-0,302
0,421	0,041	0,407	1,969	0,009	-0,251
0,772	0,048	0,476	1,972	0,010	-0,206
0,892	0,056	0,543	1,975	0,024	0,175
0,918	0,063	0,594	2,035	0,035	0,339
0,905	0,071	0,646	2,044	0,040	0,397
1,127	0,081	0,703	2,056	0,045	0,448
1,156	0,091	0,753	2,084	0,051	0,502
1,089	0,100	0,794	2,202	0,056	0,543

1,403	0,110	0,836	2,251	0,061	0,580
1,218	0,119	0,870	2,297	0,065	0,607
1,187	0,128	0,902	2,359	0,070	0,640
1,738	0,136	0,928	2,416	0,075	0,670
1,815	0,146	0,959	2,491	0,079	0,692
1,986	0,154	0,982	2,574	0,084	0,719
2,021	0,163	1,007	2,662	0,089	0,744
2,218	0,172	1,030	2,742	0,094	0,768
2,235	0,181	1,052	2,763	0,099	0,790
2,263	0,189	1,071	2,779	0,104	0,811
2,277	0,196	1,087	2,796	0,109	0,832
2,284	0,201	1,098	2,829	0,114	0,851
2,295	0,206	1,108	2,833	0,120	0,874
2,323	0,211	1,119	2,890	0,124	0,888



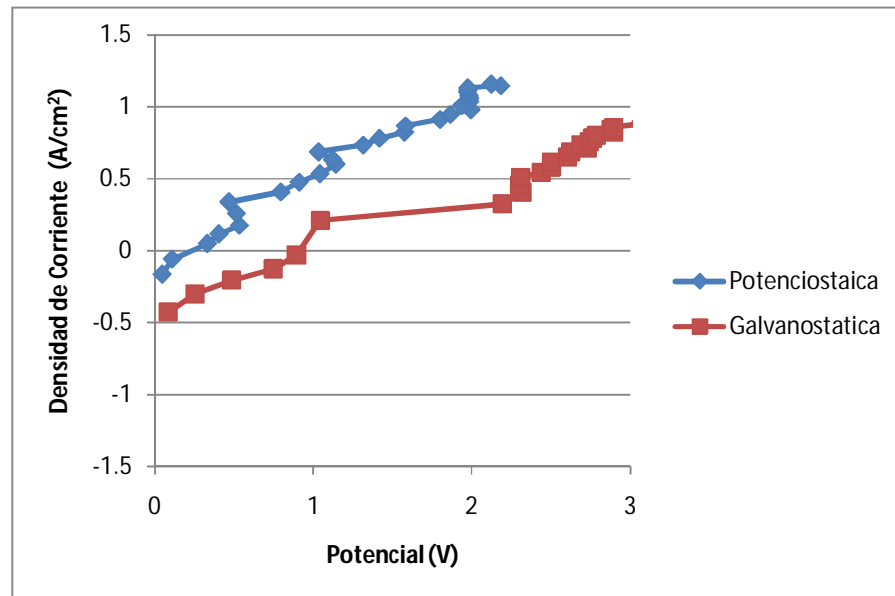
**Figura 2.12. Curva Potenciostática y Galvanostática sin inyección de oxígeno Acero ASTM 42**



**Tabla 3. Datos del acero ASTM 42 con inyección de oxígeno**

<b>A42 Potenciostática Con O2</b>			<b>A42 Galvanostática Con O2</b>		
<b>P (V)</b>	<b>I (A)</b>	<b>i (A/cm2)</b>	<b>P (V)</b>	<b>I (A)</b>	<b>i (A/cm2)</b>
0,046	0,011	-0,164	0,083	0,006	-0,427
0,110	0,014	-0,059	0,252	0,008	-0,302
0,332	0,018	0,050	0,486	0,010	-0,206
0,405	0,021	0,117	0,746	0,012	-0,126
0,534	0,024	0,175	0,893	0,015	-0,029
0,515	0,029	0,257	1,043	0,026	0,209
0,467	0,035	0,339	2,194	0,034	0,326
0,794	0,041	0,407	2,314	0,041	0,407
0,910	0,048	0,476	2,299	0,046	0,457
1,042	0,055	0,535	2,309	0,052	0,510
1,142	0,064	0,601	2,437	0,056	0,543
1,121	0,069	0,633	2,501	0,061	0,580
1,032	0,078	0,687	2,501	0,066	0,614
1,314	0,087	0,734	2,603	0,072	0,652
1,418	0,097	0,781	2,622	0,078	0,687
1,575	0,107	0,824	2,729	0,083	0,714
1,582	0,118	0,866	2,689	0,087	0,734
1,800	0,131	0,912	2,741	0,092	0,758
1,866	0,142	0,947	2,764	0,097	0,781
1,993	0,153	0,979	2,787	0,102	0,803
1,937	0,164	1,009	2,897	0,107	0,824
1,986	0,175	1,037	2,877	0,111	0,840
1,985	0,185	1,062	2,896	0,116	0,859
1,982	0,192	1,078	3,025	0,121	0,877
1,972	0,204	1,104	3,022	0,126	0,895

1,975	0,211	1,119	3,056	0,132	0,915
1,974	0,218	1,133	3,097	0,136	0,928
2,181	0,225	1,147	3,163	0,142	0,947
2,121	0,231	1,158	3,175	0,146	0,959

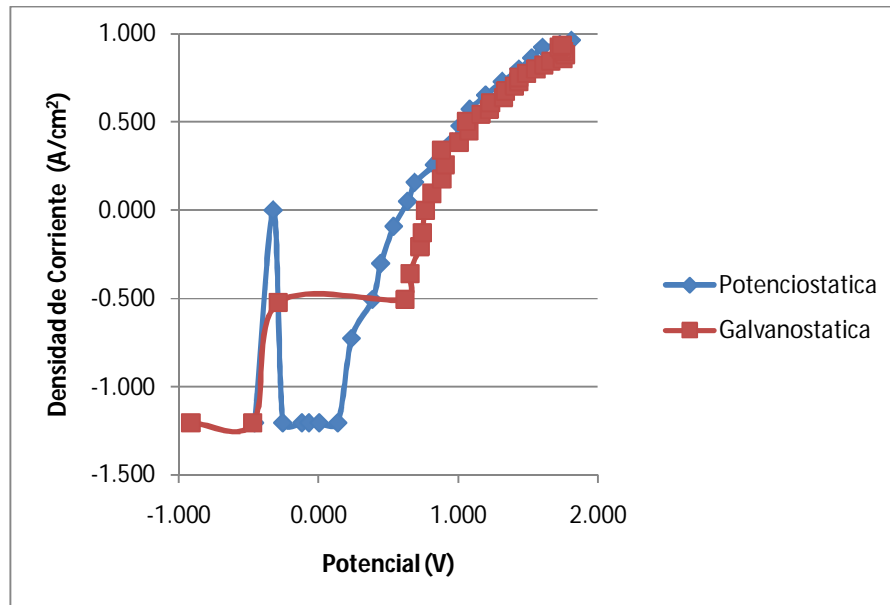


**Figura 2.13. Curva Potenciostática y Galvanostática con inyección de oxígeno Acero ASTM 42**

**Tabla 4. Datos del acero INOX 304 sin inyección de oxígeno**

A42 Potenciostática Con O2			A42 Galvanostática Con O2		
P (V)	I (A)	i (A/cm2)	P (V)	I (A)	i (A/cm2)
-0,455	-0,001	-1,206	-0,914	-0,001	-1,206
-0,323	0,000	0,000	-0,467	-0,001	-1,206
-0,254	0,001	-1,206	-0,288	-0,005	-0,524
-0,119	0,001	-1,206	0,621	0,005	-0,507

-0,068	0,001	-1,206	0,655	0,007	-0,360
0,006	0,001	-1,206	0,726	0,010	-0,206
0,139	0,001	-1,206	0,747	0,012	-0,126
0,237	0,003	-0,728	0,766	0,016	-0,001
0,387	0,005	-0,507	0,816	0,020	0,095
0,447	0,008	-0,302	0,885	0,024	0,175
0,540	0,013	-0,092	0,910	0,029	0,257
0,639	0,018	0,050	0,879	0,035	0,339
0,692	0,023	0,156	1,006	0,039	0,386
0,829	0,029	0,257	1,076	0,045	0,448
0,960	0,039	0,386	1,059	0,051	0,502
1,016	0,048	0,476	1,164	0,056	0,543
1,085	0,060	0,573	1,225	0,060	0,573
1,198	0,072	0,652	1,231	0,065	0,607
1,316	0,086	0,729	1,327	0,070	0,640
1,437	0,101	0,799	1,339	0,076	0,675
1,528	0,117	0,863	1,404	0,081	0,703
1,605	0,134	0,922	1,434	0,086	0,729
1,732	0,139	0,937	1,435	0,091	0,753
1,815	0,147	0,962	1,491	0,096	0,777
			1,557	0,101	0,799
			1,615	0,107	0,824
			1,663	0,112	0,844
			1,751	0,116	0,859
			1,768	0,122	0,881
			1,758	0,127	0,898
			1,738	0,131	0,912
			1,723	0,135	0,925

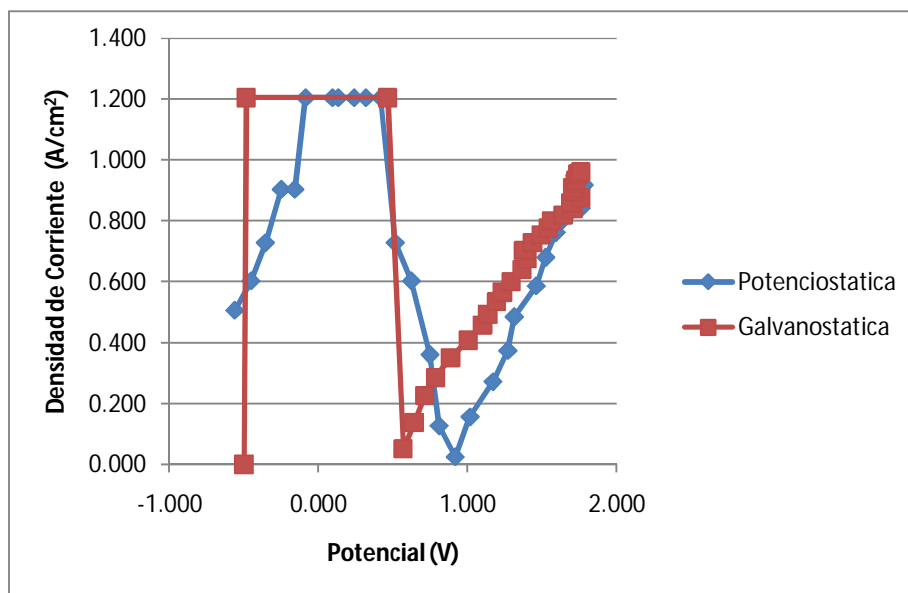


**Figura 2.14. Curva Potenciostática y Galvanostática sin inyección de oxígeno Acero INOX 304**

**Tabla 5. Datos del acero INOX 304 con inyección de oxígeno**

A42 Potenciostática Con O2			A42 Galvanostática Con O2		
P (V)	I (A)	i (A/cm2)	P (V)	I (A)	i (A/cm2)
-0,558	-0,005	0,507	-0,497	0,000	0,000
-0,449	-0,004	0,603	-0,482	0,001	1,206
-0,353	-0,003	0,728	0,465	0,001	1,206
-0,247	-0,002	0,905	0,570	0,018	0,050
-0,156	-0,002	0,905	0,644	0,022	0,137
-0,084	-0,001	1,206	0,714	0,027	0,226
0,096	-0,001	1,206	0,786	0,031	0,286
0,134	-0,001	1,206	0,886	0,036	0,351
0,240	-0,001	1,206	1,004	0,041	0,407

0,321	0,001	1,206	1,100	0,046	0,457
0,419	0,001	1,206	1,136	0,050	0,493
0,516	0,003	0,728	1,194	0,055	0,535
0,625	0,004	0,603	1,233	0,059	0,565
0,749	0,007	0,360	1,292	0,064	0,601
0,810	0,012	0,126	1,364	0,070	0,640
0,918	0,017	0,025	1,400	0,076	0,675
1,017	0,023	0,156	1,378	0,081	0,703
1,171	0,030	0,272	1,435	0,086	0,729
1,271	0,038	0,374	1,493	0,091	0,753
1,313	0,049	0,485	1,542	0,096	0,777
1,461	0,062	0,587	1,562	0,101	0,799
1,525	0,077	0,681	1,643	0,106	0,820
1,594	0,093	0,763	1,705	0,111	0,840
1,762	0,112	0,844	1,689	0,116	0,859
1,782	0,133	0,918	1,759	0,121	0,877
			1,719	0,126	0,895
			1,701	0,130	0,908
			1,723	0,135	0,925
			1,727	0,138	0,934
			1,738	0,144	0,953
			1,746	0,145	0,956
			1,759	0,147	0,962



**Figura 2.15. Curva Potenciostática y Galvanostática con inyección de oxígeno Acero INOX 304**

# CAPÍTULO 3

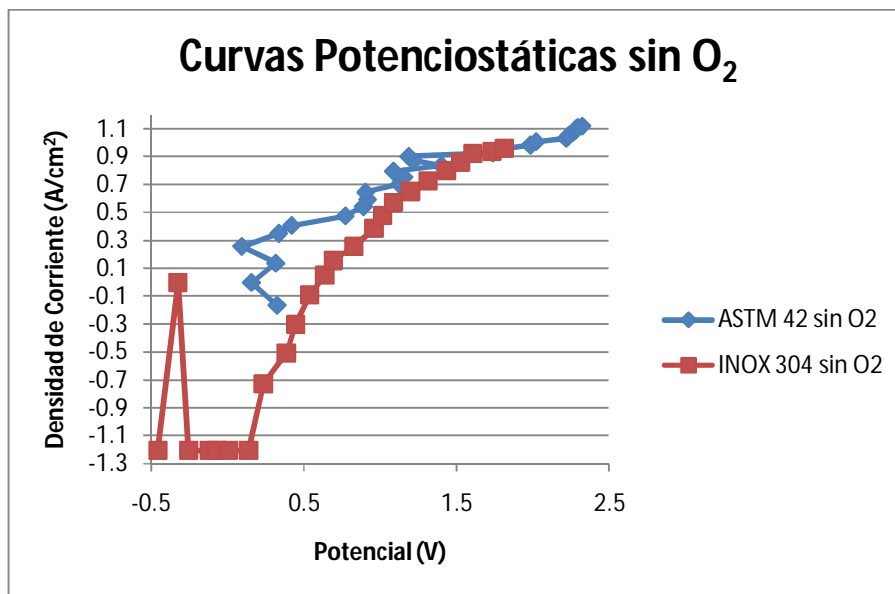
## 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 3.1. Curvas Potenciostáticas y Galvanostáticas de aceros A42 e inox 304 sin inyección de gas.

Para el efecto de análisis se estudia el comportamiento de las muestras de los aceros en estudio, como lo son el ASTM 42 y el INOX 304, aplicando métodos potenciostáticos y galvanostáticos en un medio acuoso y sin inyección de oxígeno, donde se superponen las gráficas de ambos aceros, para observar tendencias o comportamientos.

En la figura 3.1 se superponen, las curvas potenciostáticas de los aceros ASTM 42 y el INOX 304 en una sustancia acuosa de ClNa, sin inyección de oxígeno. Se observa claramente, como el acero A42 mantiene un comportamiento constante, mediante el aumento del barrido de potencial, esto nos indica que el acero tiene a corroerse, ya que nunca llega a una etapa de pasivación, caso

contrario, esto no ocurre con el acero inoxidable 304, donde si se observan las fases de activación, pasivación y transpasivación.



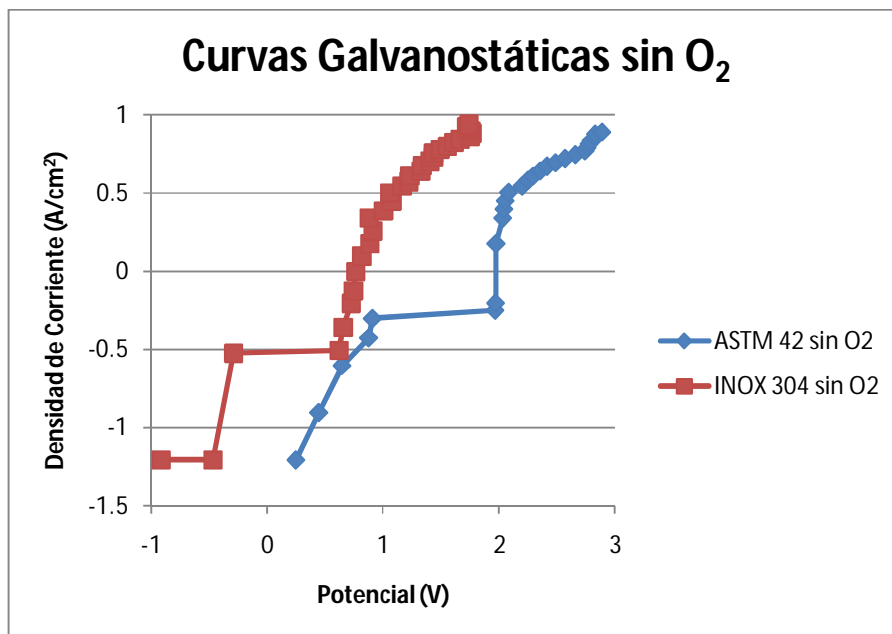
**Figura 3.1. Curvas Potenciostáticas sin inyección de O<sub>2</sub>**

En la figura 3.2, se superponen las curvas galvanostáticas de ambos aceros, sin inyección de oxígeno; en este tipo de curvas de polarización, resulta inadecuado argumentar algún estado de activación o pasivación, debido a que este método no describe una buena efectividad.

Se puede observar que los valores de la densidad de corriente, distan muy poco entre ambos aceros, pero aún así, se ve que son



mayores en el acero A42, caso contrario con respecto a las curvas potenciostáticas que se distancian mayormente.



**Figura 3.2. Curvas Galvanostáticas sin inyección de O<sub>2</sub>**

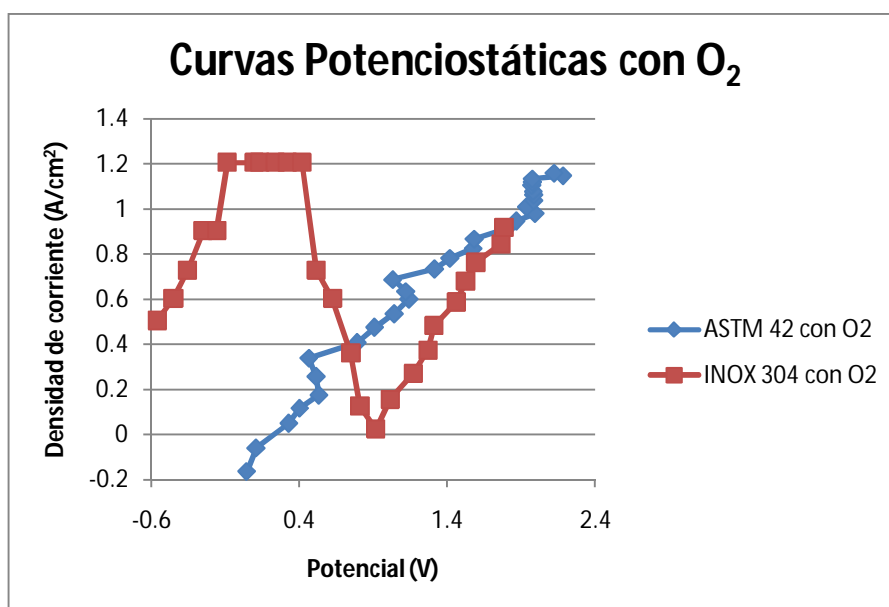
### 3.2. Curvas Potenciostáticas y Galvanostáticas de aceros A42 e inox 304 con inyección de gas.

En la figura 3.3, se detalla las curvas potenciostáticas de los aceros A42 e INOX 304, esta vez se realiza el análisis con la inyección de oxígeno en la solución acuosa de ClNa.

Se puede observar claramente, que el acero A42 conserva el comportamiento lineal, de la sustancia sin oxígeno, esto nos indica

que no importa el medio, siempre va a tender a no tener zona de pasivación, por ende se corroerá.

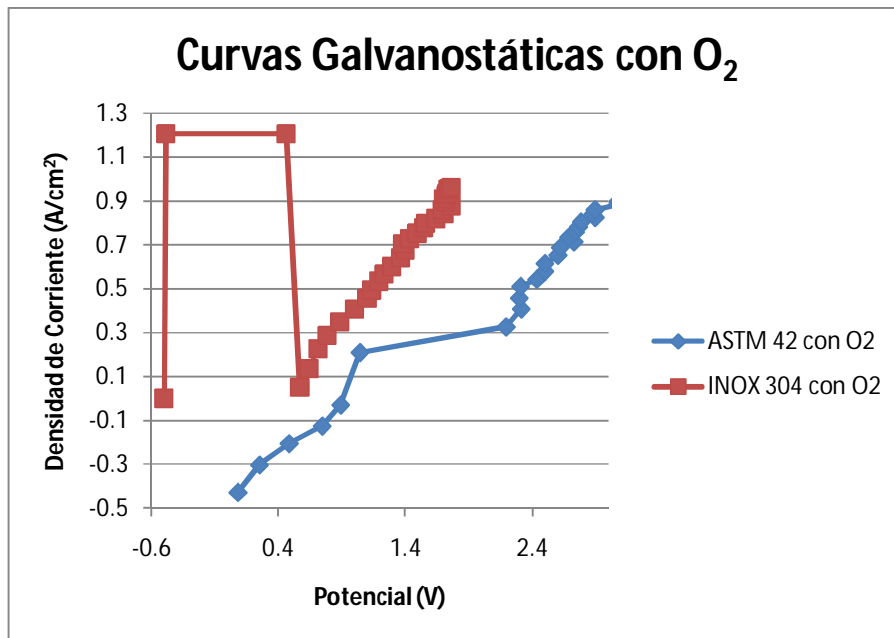
Con respecto al acero inoxidable, se observa que sí presenta, una zona de activación, pasivación y transpasividad, la diferencia ahora es, que las densidades de corriente aumentaron, y esto a su vez se debe por la inyección de oxígeno en el medio.



**Figura 3.3. Curvas Potenciostáticas con inyección de O<sub>2</sub>**

En la figura 3.4, se superponen las curvas galvanostáticas obtenidas como análisis en un medio acuoso, se vuelve a recalcar, que este método no es adecuado para predecir o determinar, si el material en estudio está en una zona de activación – pasivación,

esto se observa muy claramente, en la curva galvanostática del ASTM 42 con inyección de oxígeno, ya que se observa como si éste presentara un comportamiento pasivo, cuando realmente no está ocurriendo.

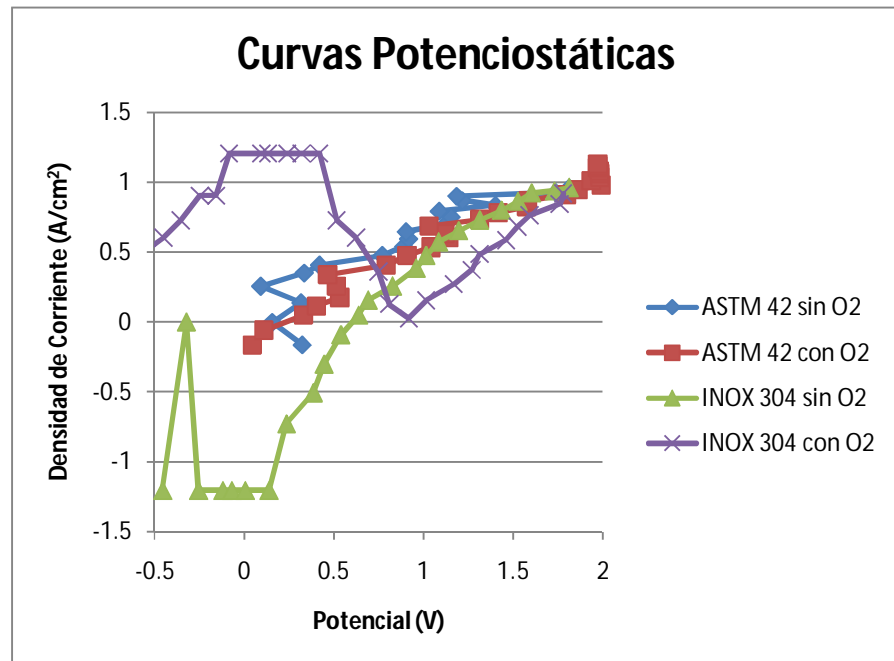


**Figura 3.4. Curvas Galvanostáticas con inyección de O<sub>2</sub>**

### 3.3. Tendencia y comparación con resultados obtenidos en Hormigón.

A continuación se realiza, una comparación de resultados obtenidos, en ambos aceros por medio del método potencioestático, considerando el medio con y sin inyección de oxígeno. Se observa claramente, como las densidades de corriente con respecto al medio con oxígeno, son mayores en el medio sin el mismo, esto

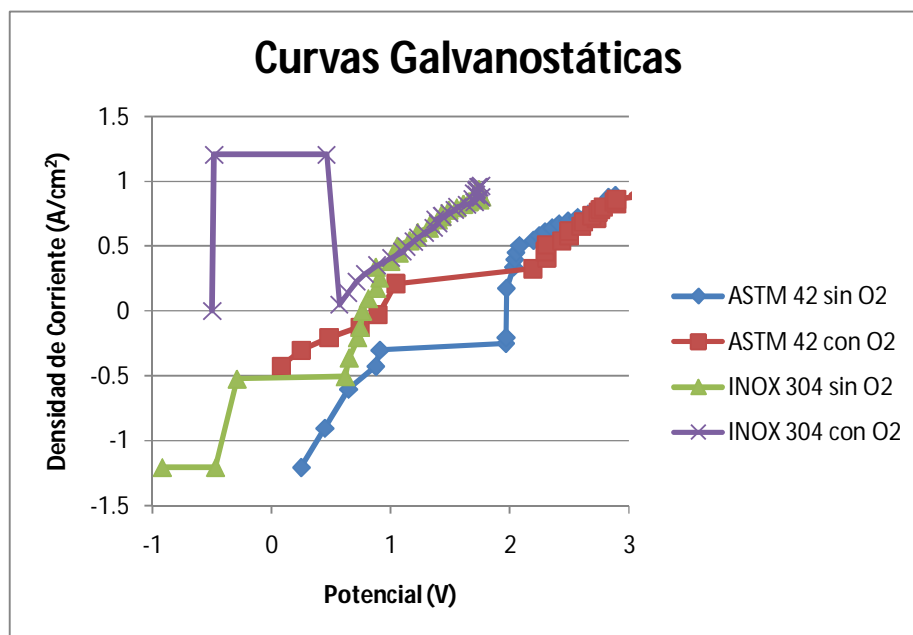
ocurre debido a que el oxígeno acelera el proceso de corrosión y convierte el medio en altamente corrosivo.



**Figura 3.5. Curvas Potenciostáticas con y sin inyección de O<sub>2</sub>**

En la figura 3.6, se detallan todas las curvas galvanostáticas, es decir de los dos aceros, y en ambos medios (con y sin inyección de oxígeno), en las mismas que se cumple lo previsto, es decir a mayor agresividad del medio (inducida por el O<sub>2</sub>), mayor serán las densidades de corriente, y por ende mayor índice de corrosión.

Esto no quiere decir que en el medio sin oxígeno no existe corrosión, existe, pero en un menor índice, ya que las densidades de corriente, se presentan en menor escala.



**Figura 3.6. Curvas Galvanostáticas con y sin inyección de O2**

Luego de superponer varias curvas, para obtener una mayor perspectiva en el análisis, podemos analizar y comparar con respecto a resultados obtenidos en probetas embebidas en hormigón, dichas probetas han sido analizadas por medio del método Resistencia Polarización, en distintos medios, como lo son al ambiente, inmersas en ClNa, y en una cámara de carbonatación, dando como resultado que el medio más agresivo es el de ClNa, ya

que en los medios restantes presenta un comportamiento casi similar.

El método aplicado a las probetas embebidas en hormigón, fue resistencia polarización ( $R_p$ ), uno totalmente independiente al aplicado en este proyecto, pero que a su vez es de gran uso y desarrollable en probetas inmersas en medios acuosos, la gran diferencia, entre los análisis de ambos medios, son los valores de la densidad de corriente, ya que en hormigón son mucho menores, y esto demuestra el porqué las estructuras de acero son protegidas por dicho material.

#### **3.4. Cálculo de velocidad de corrosión ASTM G 102–89 “Práctica estándar para el cálculo de tasas de corrosión e información relacionada con mediciones electroquímicas”.**

En este punto, se realiza el cálculo de la tasa de corrosión, mediante la aplicación de la norma ASTM G102–89, este cálculo se basa solo en las mediciones potencioestáticas, ya que las mediciones galvanostáticas nos pueden dar un valor erróneo, se realiza la comparación de resultados entre ambos aceros, y en los medios con y sin inyección de oxígeno.

Para estos cálculos, se utilizan datos de tablas que se detallan en los apéndices de este proyecto, se realiza una comparación de la tasa de corrosión en ambos aceros en estudio, considerando el medio con y sin inyección de oxígeno.

- 1) Primero se describe la composición de cada uno de los aceros utilizados, para así determinar el peso equivalente, de dicho material (EW).

#### ASTM 615 (A42)

Elemento	%	n	Peso
C	0.4184	2	12.01
Mn	0.5582	2	54.94
Si	0.0884	4	28.09
S	0.0331	2	32.06
Cu	0.0249	1	63.54

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

$$N_{EQ} = \left( \frac{0.4184 * 2}{12.01} \right) + \left( \frac{0.5582 * 2}{54.94} \right) + \left( \frac{0.0884 * 4}{28.09} \right)$$

$$N_{EQ} = 0.1084$$

$$EW = \frac{1}{N_{EQ}}$$

$$EW = \frac{1}{0.1084}$$

$$EW = 9.2584$$

**INOX 304**

Elemento	%	n	Peso
Cr	0.19	3	52.00
Ni	0.0925	2	58.71
Fe	0.7175	1	55.85

$$N_{EQ} = \sum \left( \frac{fi * ni}{ai} \right)$$

$$N_{EQ} = \left( \frac{0.19 * 3}{52.00} \right) + \left( \frac{0.0925 * 2}{58.71} \right) + \left( \frac{0.7175 * 1}{55.85} \right)$$

$$N_{EQ} = 0.0398$$

$$EW = \frac{1}{N_{EQ}}$$

$$EW = \frac{1}{0.0398}$$

$$EW = 25.12$$

2) Luego se procede al cálculo de la tasa de corrosión (CR), para los dos aceros, en ambos medios.

**ASTM 615 (A42) (Sin O<sub>2</sub>):**

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

$$1.9565 = \frac{0.020}{i_{corr}}$$

$$i_{corr} = \frac{0.020}{1.9565}$$



$$i_{corr} = 0.0102 \text{ A/cm}^2$$

$$CR = 0.129 * \left( \frac{EW}{\delta} \right) * i_{corr}$$

$$CR = 0.129 * \left( \frac{9.2584}{7.87} \right) * 0.0102$$

$$CR = 0.094 \text{ mpy}$$

**ASTM 615 (A42) (Sin O<sub>2</sub>):**

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

$$1.6795 = \frac{0.020}{i_{corr}}$$

$$i_{corr} = \frac{0.020}{1.9565}$$

$$i_{corr} = 0.012 \text{ A/cm}^2$$

$$CR = 0.129 * \left( \frac{EW}{\delta} \right) * i_{corr}$$

$$CR = 0.129 * \left( \frac{9.2584}{7.87} \right) * 0.012$$

$$CR = 0.1128 \text{ mpy}$$

**INOX 304 (Sin O<sub>2</sub>):**

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

$$0.7671 = \frac{0.024}{i_{corr}}$$

$$i_{corr} = \frac{0.024}{0.7671}$$

$$i_{corr} = 0.031 \text{ A/cm}^2$$

$$CR = 0.129 * \left(\frac{EW}{\delta}\right) * i_{corr}$$

$$CR = 0.129 * \left(\frac{9.2584}{7.87}\right) * 0.031$$

$$CR = 0.013 \text{ mpy}$$

**INOX 304 (Con O<sub>2</sub>):**

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

$$0.6546 = \frac{0.020}{i_{corr}}$$

$$i_{corr} = \frac{0.020}{0.6546}$$

$$i_{corr} = 0.037 \text{ A/cm}^2$$

$$CR = 0.129 * \left(\frac{EW}{\delta}\right) * i_{corr}$$

$$CR = 0.129 * \left(\frac{25.12}{7.9}\right) * 0.037$$

$$CR = 0.015 \text{ mpy}$$

Luego de realizados los cálculos, se procede a presentar las debidas conclusiones y recomendaciones sobre este proyecto.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se concluye lo siguiente:

1. La técnica potencioestática, se puede usar para un cálculo directo de la velocidad de corrosión, así como también para indicar las condiciones de pasividad y tendencia de un metal o aleación a picarse o corroerse.
2. La técnica galvanostática, es más simple que la potencioestática, pero no puede utilizarse en caso de existir cambios bruscos en la curva de potencial vs corriente, tal como sucede durante la pasivación de los metales.
3. Las técnicas aplicadas, se tratan de métodos no destructivos, muy sencillas de aplicar, ya que no necesita de equipamiento sofisticado o de personal altamente especializado.

4. La tasa de corrosión en el acero ASTM 615, resultó mayor en un 13%, que la presentada en el INOX 304, logrando demostrar las muy buenas propiedades ya conocidas del mismo.
5. Al inyectar la solución acuosa con oxígeno, se logró demostrar que el medio se vuelve más corrosivo, ya que la tasa de corrosión aumentó en un 20% en el acero ASTM42 y un 15% en el acero INOX 304.

Se recomienda lo siguiente:

1. Durante experimentaciones futuras se recomienda, realizar el cambio de la solución electrolítica mínimo cada tres ensayos, esto prevendrá de una posible contaminación de los productos de corrosión dentro de la solución.
2. Para una mayor fiabilidad en la obtención de datos, se recomienda utilizar un Sistema de Adquisición de Datos (SCADA) basados en controladores PID o en PLC.
3. Impulsar el estudio de otras técnicas electroquímicas, como lo es el de la espectroscopía de impedancia electroquímica, para análisis de un acero A588, que es utilizado en estructuras portuarias.

# APÉNDICES

## VALUES OF THE CONSTANT B

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	$\infty$	13
	60	60	13
	60	90	16
	60	120	17
	60	180	20
	60	$\infty$	26
	90	90	20
	90	120	22
	90	180	26
	90	$\infty$	39
	120	120	26
	120	$\infty$	52
	180	180	39
	180	$\infty$	78
Iron, 4% NaCl, pH 1.5	-	-	17
Iron, 0.5N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 30 C	-	-	17
Iron, 1N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	10-20
Iron, 1N HCl	-	-	18-23
Iron, 0.02M citric acid, pH 2.6, 35 C	-	-	12
Carbon steel, seawater	57	$\infty$	25
Carbon steel, 1N Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , pH 6.3, 30 C	-	-	19
304L SS, 1N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , O <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , 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 <sub>2</sub> , 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.

**STANDARD REFERENCE POTENTIALS  
AND CONVERSION TABLE  
REFERENCE POTENTIALS**

Electrode	Potential (V) @ 25°C		Thermal Temperature Coefficient <sup>(a)</sup> (mV/°C)
	E <sup>(b)</sup>	E <sup>(c)</sup>	
(Pt)/H <sub>2</sub> (α = 1)/H <sup>+</sup> + (α - 1) (SHE)	0.000	***	+0.87
Ag/AgCl/1M KCl	+0.235	***	+0.25
Ag/AgCl/0.6M Cl <sup>-</sup> (seawater)	+0.25	***	***
Ag/AgCl/0.1M Cl <sup>-</sup>	+0.288	***	+0.22
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /sat KCl (SCE)	+0.241	+0.244	+0.22
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /1M KCl	+0.280	+0.283	+0.59
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /0.1M KCl	+0.334	+0.336	+0.79
Cu/CuSO <sub>4</sub> sat	+0.30	***	+0.90
Hg/Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	+0.616	***	+0.09

<sup>(a)</sup> To convert from thermal to isothermal temperature coefficients, subtract 0.87 mV/°C.

Thus the isothermal temperature coefficient for Ag/AgCl/1M KCl is -0.62 mV/°C.

<sup>(b)</sup> E<sup>(b)</sup> is the standard potential for the half cell corrected for the concentration of the ions.

<sup>(c)</sup> E<sup>(c)</sup> also includes the liquid junction potentials for a saturated KCl salt bridge.

**CONVERSION FACTORS<sup>(d)</sup>**

From (E')	To SHE Scale	To SCE Scale (E')
H <sub>2</sub> /H <sup>+</sup>	***	-0.241
Ag/AgCl/1M KCl	+0.235	-0.006
Ag/AgCl/0.6M Cl <sup>-</sup> (seawater)	+0.25	+0.009
Ag/AgCl/0.1M Cl <sup>-</sup>	+0.288	+0.047
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /sat KCl (SCE)	+0.241	***
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /1M KCl	+0.280	+0.039
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /0.1M KCl	+0.334	+0.093
Cu/CuSO <sub>4</sub> sat	+0.30	+0.06
Hg/Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	+0.616	***

<sup>(d)</sup> To convert from one scale to another, add the value indicated.

Example:

An electrode potential of +1.000V versus SCE would be (1.000 + 0.241) = +1.241V versus SHE. An electrode potential of -1.000V versus SCE would give (-1.000 + 0.241) = -0.759V versus SHE.

Source: ASTM, G 3, (2000 Edition). Reprinted, with permission, copyright ASTM.

**STANDARD REFERENCE POTENTIALS  
AND CONVERSION TABLE  
REFERENCE POTENTIALS**

Electrode	Potential (V) @ 25°C		Thermal Temperature Coefficient <sup>(a)</sup> (mV/°C)
	E <sup>(b)</sup>	E <sup>(c)</sup>	
(Pt)/H <sub>2</sub> (x - 1)/H + (x - 1) (SHE)	0.000	***	+0.87
Ag/AgCl/1M KCl	+0.235	***	+0.25
Ag/AgCl/0.6M Cl <sup>-</sup> (seawater)	+0.25	***	***
Ag/AgCl/0.1M Cl <sup>-</sup>	+0.288	***	+0.22
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /sat KCl (SCE)	+0.241	+0.244	+0.22
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /1M KCl	+0.280	+0.283	+0.59
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /0.1M KCl	+0.334	+0.336	+0.79
Cu/CuSO <sub>4</sub> sat	+0.30	***	+0.90
Hg/Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	+0.616	***	+0.09

<sup>(a)</sup> To convert from thermal to isothermal temperature coefficients, subtract 0.87 mV/°C.

Thus the isothermal temperature coefficient for Ag/AgCl/1M KCl is -0.62 mV/°C.

<sup>(b)</sup> E<sup>(b)</sup> is the standard potential for the half cell corrected for the concentration of the ions.

<sup>(c)</sup> E<sup>(c)</sup> also includes the liquid junction potentials for a saturated KCl salt bridge.

**CONVERSION FACTORS<sup>(d)</sup>**

From (E')	To SHE Scale	To SCE Scale (E')
H <sub>2</sub> /H <sup>+</sup>	***	-0.241
Ag/AgCl/1M KCl	+0.235	-0.006
Ag/AgCl/0.6M Cl <sup>-</sup> (seawater)	+0.25	+0.009
Ag/AgCl/0.1M Cl <sup>-</sup>	+0.288	+0.047
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /sat KCl (SCE)	+0.241	***
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /1M KCl	+0.280	+0.039
Hg/Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> /0.1M KCl	+0.334	+0.093
Cu/CuSO <sub>4</sub> sat	+0.30	+0.06
Hg/Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	+0.616	***

<sup>(d)</sup> To convert from one scale to another, add the value indicated.

Example:

An electrode potential of +1.000V versus SCE would be (1.000 + 0.241) = +1.241V versus SHE. An electrode potential of -1.000V versus SCE would give (-1.000 + 0.241) = -0.759V versus SHE.

Source: ASTM, G 3, (2000 Edition). Reprinted, with permission, copyright ASTM.



## VALUES OF THE CONSTANT B

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	$\infty$	13
	60	60	13
	60	90	16
	60	120	17
	60	180	20
	60	$\infty$	26
	90	90	20
	90	120	22
	90	180	26
	90	$\infty$	39
	120	120	26
	120	$\infty$	52
	180	180	39
	180	$\infty$	78
Iron, 4% NaCl, pH 1.5	-	-	17
Iron, 0.5N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , 30 C	-	-	17
Iron, 1N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-	-	10-20
Iron, 1N HCl	-	-	18-23
Iron, 0.02M citric acid, pH 2.6, 35 C	-	-	12
Carbon steel, seawater	57	$\infty$	25
Carbon steel, 1N Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , pH 6.3, 30 C	-	-	19
304L SS, 1N H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , O <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , H <sub>2</sub> , 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 <sub>2</sub> , 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.

## CORROSION RATE CONVERSION FACTORS

$$\text{Mils/year (mpy)} = C \times \frac{\text{weight loss}}{\text{area} \times \text{time}} \times K$$

$$\text{Millimetres/year (mm/y)} = 0.0254 \text{ mpy}$$

Weight Loss	Area	C Factors				
		Hour	Day	Week	Month	Year
mg	cm <sup>2</sup>	437	18.2	2.59	0.598	0.0498
	dm <sup>2</sup>	4.37	0.182	0.0259	$5.98 \times 10^{-3}$	$4.98 \times 10^{-4}$
	m <sup>2</sup>	0.0437	$1.82 \times 10^{-3}$	$2.59 \times 10^{-4}$	$5.98 \times 10^{-5}$	$4.98 \times 10^{-6}$
	in <sup>2</sup>	67.7	2.82	0.402	0.0927	$7.72 \times 10^{-3}$
	ft <sup>2</sup>	0.470	0.0196	$2.79 \times 10^{-3}$	$6.44 \times 10^{-4}$	$5.36 \times 10^{-5}$
g	cm <sup>2</sup>	$437 \times 10^3$	$182 \times 10^2$	2590	598	49.8
	dm <sup>2</sup>	4370	182	25.9	5.98	0.498
	m <sup>2</sup>	43.7	1.82	0.259	0.0598	$4.98 \times 10^{-3}$
	in <sup>2</sup>	$677 \times 10^2$	2820	402	92.7	7.72
	ft <sup>2</sup>	470	19.6	2.79	0.644	0.0536
lb	cm <sup>2</sup>	$198 \times 10^6$	$825 \times 10^4$	$118 \times 10^4$	$271 \times 10^3$	$226 \times 10^2$
	dm <sup>2</sup>	$198 \times 10^4$	$825 \times 10^2$	$118 \times 10^2$	2710	226
	m <sup>2</sup>	$198 \times 10^2$	825	118	27.1	2.26
	in <sup>2</sup>	$307 \times 10^5$	$128 \times 10^4$	$182 \times 10^3$	$420 \times 10^2$	3500
	ft <sup>2</sup>	$213 \times 10^3$	8880	1270	292	24.3

EXAMPLE: A 5.0 square inch specimen of copper has a weight loss of 218 mg in a 40 hour corrosion test.

$$\text{mpy} = 67.7 \times \frac{218.}{5.0 \times 40} \times 0.88 = 65$$

$$\text{mm/y} = 0.0254 \times 65 = 1.65$$

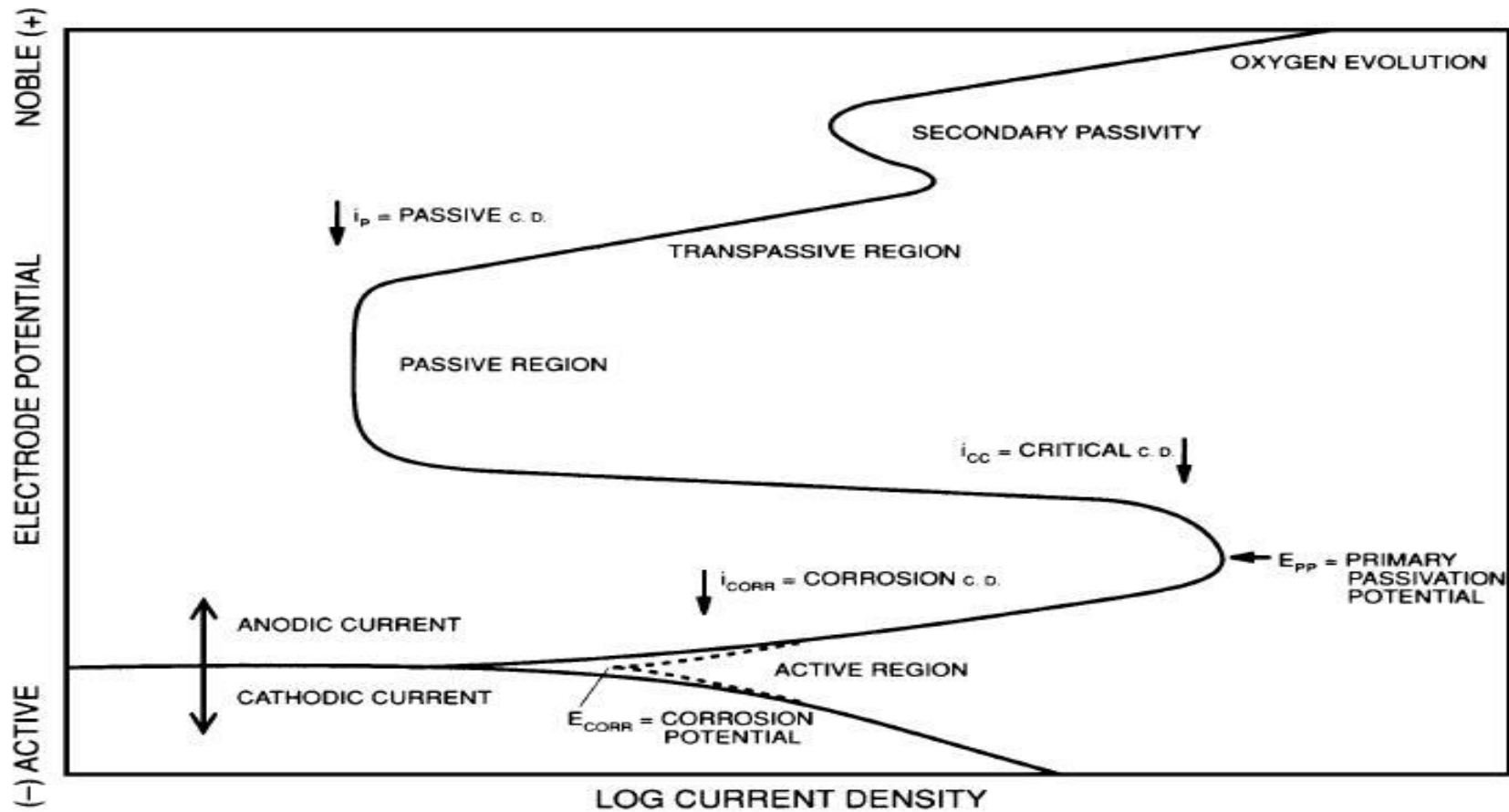
K is a density factor.

K = 1.000 for carbon steel.

K factors for other alloys are given on the next page.

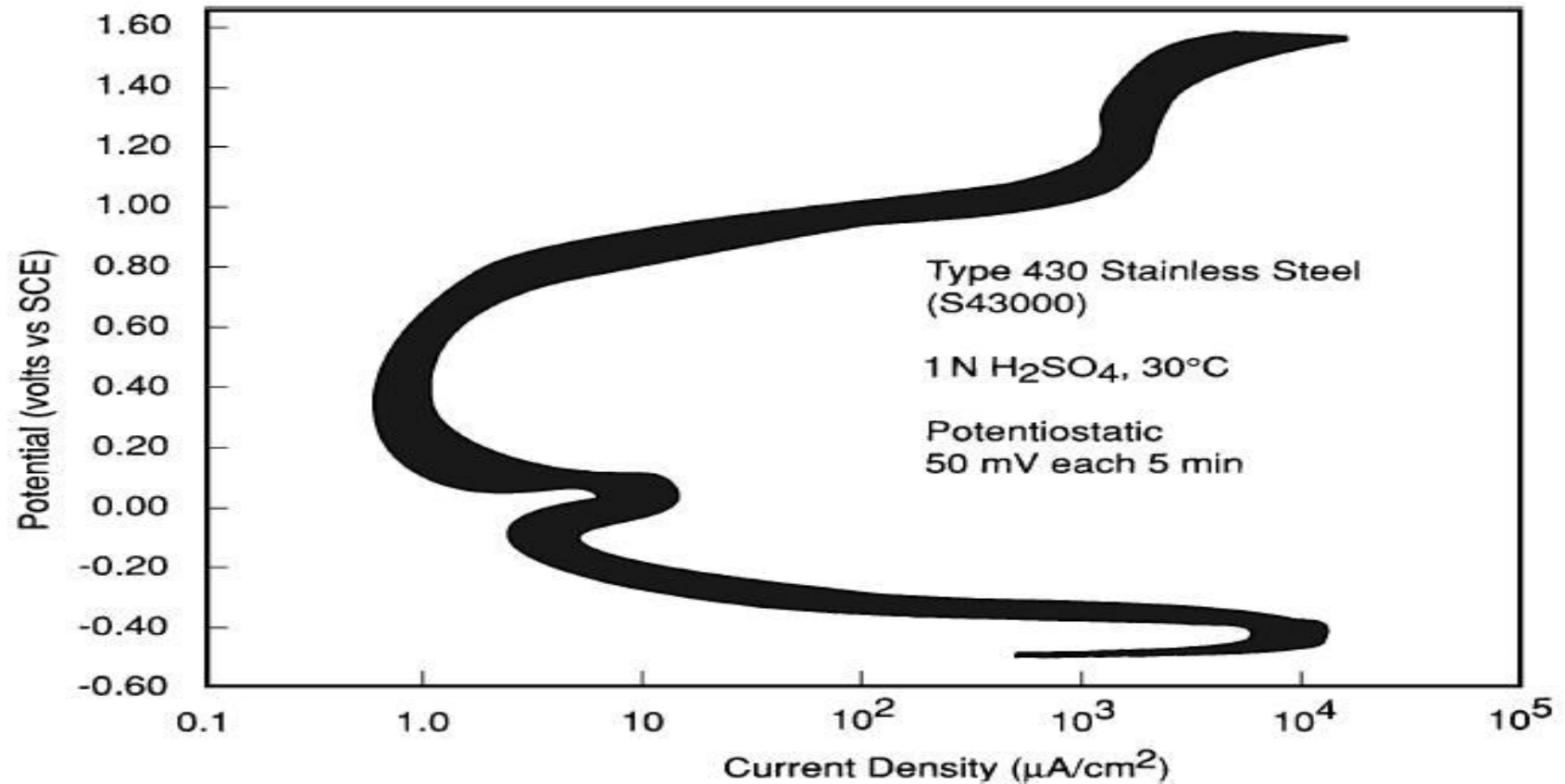
Source: Courtesy Aaron Wachter.

# POLARIZATION PLOTS FOR A PASSIVE ANODE



Source: ASTM, G 3, Fig. 4, (2000 Edition). Reprinted, with permission, copyright ASTM.

## TYPICAL STANDARD POTENTIOSTATIC ANODIC POLARIZATION PLOT



Source: ASTM, G 5, Fig. 4 (2000 Edition). Reprinted, with permission, copyright ASTM.

## BIBLIOGRAFÍA

1. José R. Galvele y Gustavo S. Duffó, "Degradación de Materiales - Corrosión", Tercera Edición, Ediciones Jorge Baudino, 2006
2. Denny A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, Segunda Edición, Prentice Hall
3. Herbert H. Uhlig, Corrosión y control de corrosión, Segunda Edición, Urmo, S.A. de Ediciones, 1979
4. Bard A. J., Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications, Segunda Edición, 1990
5. KORYTA J., Ions, electrodes and membranes. 2d ed., 1991
6. Princeton Applied Research, Manual de Instrucciones (Potenciostato De Exploración Modelo 362), Primera Edición
7. ASTM Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potenciodynamic Anodic Polarization Measurements: ASTM G5-94.
8. ASTM Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements: ASTM G102-89.

9. CORTE MORQUECHO, DANIEL. “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” (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010).
  
10. HUIRACUCHA SAENZ, WILSON ANDRES. “Determinación de la Velocidad de Corrosión del Acero ASTM A-42 en Hormigones Diseñados con Cemento Tipo Puzolánicos Mediante Técnicas Cinéticas de Laboratorio” (Tesis, Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2010).
  
11. Celdas electroquímicas: <http://www.princetonappliedresearch.com>
  
12. Enciclopedia libre: <http://wikipedia.org/>