

3



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO

---

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLAN

MODELO EXPERIMENTAL DE ESTUDIO DE LA  
CORROSION MICROBIOLÓGICA EN ACERO 1020.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:  
INGENIERA QUIMICA  
P R E S E N T A :  
SAYDE ATZIN RAMIREZ

ASESOR: M.C. JOSE DE JESUS PEREZ SAAVEDRA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

2000

2000



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

Con eterna gratitud y cariño a mi madre, por sus consejos y apoyo brindado en todo momento de mi vida.

Por su cariño y comprensión a mis hermanos: Alfredo, Mari. José e Itzel

Por su gran cariño a mis abuelos

A mis tíos por su apoyo y estímulo

Con todo cariño, respeto y admiración a mi asesor de tesis: M.C. José de Jesús Pérez Saavedra por sus sabios consejos y conocimientos

A mis amigas, en especial a Juanita por su gran amistad.

A mis compañeros de Asesores en Control Ambiental Integral, S.A. de C.V. por su alegría y apoyo

A mis profesores por sus enseñanzas

Al T.A. Ismael Sagrero Huitareo por su valiosa ayuda

Al T.A. Drauci Jiménez Celi por la elaboración del reactor.

Al Q. Porfirio García Estrada Responsable Técnico (UNAM-BID) del laboratorio de Química Industrial y a la Q. Ana María Velázquez Sánchez Responsable académico del Laboratorio de Química industrial por todas las facilidades y apoyo prestado para la utilización del equipo VoltaLab<sup>TM</sup>32 Electrochemical Laboratory.

A Q.F.B Gloria García García por su invaluable apoyo en la parte correspondiente al estudio microbiológico.



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN  
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR  
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES

ERIDAD NACIONAL  
 AVTINMA DE  
 MEXICO

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.

DEPARTAMENTO DE EXAMENES  
 PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO  
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN  
 PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares  
 Jefe del Departamento de Exámenes  
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS

Modelo Experimental de Estudio de la Corrosión  
Microbiológica en Acero 1020.

que presenta la pasante Savde Atzin Ramírez  
 con número de cuenta 9256211-6 para obtener el TITULO de:  
Ingeniera Química

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

ATENTAMENTE  
 "POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcali, Edo. de Méx., a 26 de junio de 2000

PRESIDENTE I.Q. Gloria Porjon Apan

VOCAL I.Q.M. Rafael Sarpore Morales

SECRETARIO M.en C. José de Jesús Pérez Saavedra

PRIMER SUPLENTE I.B.Q. Jaime Flores Minutti

SEGUNDO SUPLENTE Dra. Adriana Morales Pérez

## INDICE

	Pág
1 0 Introducción.	1
2 0 Antecedentes y Generalidades.	3
2.1. Definición e Importancia de la Corrosión	3
2.2 Tipos de Corrosión.	4
2.3 Corrosión Microbiológica	8
2.3.1 Descripción de los microorganismos	8
2.3.2. Factores que influyen en la Corrosión.	10
2.3.3 Mecanismos de la Corrosión Microbiológica.	11
2.4 Métodos para probar la Corrosión	13
2.4 1 Métodos de Prueba.	13
2 5 Películas Superficiales de pasivación.	16
2.5 1 Condiciones que favorecen las películas	16
2.5.2 Películas superficiales y Polarización	17
2.6 Metalurgia del Hierro	17
2 7 Clasificación de las aleaciones Hierro-Carbono.	18
2.8 Normas Society of Automotiv Engineeers (SAE) y American Iron & Steel Institute ( AISI)	23
3.0 Objetivos del trabajo experimental	24
4 0 Desarrollo Experimental	24
4.1 Material y Métodos.	24
4 1 1 Elaboración de las Probetas	24
4 1.2 Preparación de las Celdas de Trabajo	24
4.2 Determinación del Potencial de Reposo	28
4 3 Determinación de las Pendientes de Tafel	32

## 1.0 INTRODUCCIÓN

La corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente. La corrosión microbiológica incluye todo fenómeno de destrucción, debido a la presencia de microorganismos, ya sea que actúen directamente o por medio de las sustancias provenientes de su metabolismo que desempeñan un papel importante al acelerar un proceso ya establecido o al crear las condiciones favorables para que se produzca dicho fenómeno.

En los procesos químicos de generación de electricidad y combustibles se ha reconocido el grave daño que propicia la corrosión inducida por microorganismos. Los microorganismos colonizan cualquier tipo de material de construcción, bajo ciertas condiciones mínimas de nutrientes, y producen biopelículas. Las biopelículas son variadas en su composición, aunque usualmente incluyen bacterias, algas y hongos, en ellas se absorben diversos tipos de materiales como por ejemplo metales pesados, partículas inorgánicas y los constituyentes celulares. Las bacterias implicadas en los procesos de corrosión son hierro-oxidantes, hierro-reductoras, sulfuro-oxidantes, sulfuro reductoras, sulfato-reductoras, productoras de ácido, productoras de hidrógeno, etc.

Una de las dificultades con que se ha encontrado el ingeniero en corrosión ha sido no contar con métodos rápidos y confiables, que le proporcionen información acerca de la naturaleza del fenómeno de corrosión, de tal manera que sea posible tomar medidas preventivas que tiendan a evitar fallas que se traducen en grandes pérdidas económicas y que puedan ser catastróficas.

Dada la naturaleza electroquímica de la corrosión, es posible aplicar diferentes métodos electroquímicos para el estudio de diversos tipos de problemas de corrosión, ya sea simulando condiciones en el laboratorio o realizando dichos estudios en campo.

La principal ventaja de los métodos electroquímicos es la realización de mediciones de corrosión de alta exactitud en un tiempo muy corto respecto a las técnicas tradicionales. No obstante, presentan la desventaja de perturbar al sistema en corrosión mediante una polarización externa impuesta, la cual puede conducir a cambios inevitables en propiedades específicas del sistema como son: la estructura superficial del metal que se corroe, la absorción y adsorción de hidrógeno, la formación de películas superficiales de productos de corrosión, reacciones redox, etc.

Cabe mencionar que las ventajas que ofrecen los métodos electroquímicos superan por mucho a las desventajas. Sin embargo, debido a las perturbaciones que provoca la polarización, en ocasiones es difícil interpretar los resultados de las mediciones de Rapidez de Corrosión.

Para la realización de esta tesis se utilizó el equipo *VoltaLab™ 32 Electrochemical Laboratory* que consiste en un DEA-1 Analizador Digital Electroquímico y un Software *VoltaMaster2* para técnicas electroquímicas. El *VoltaMaster2* contiene 10 técnicas electroquímicas: FAST (Free Access Signal Technique), Pause, Open Circuit Potential, Chronopotentiometry, Chronoamperometry, Linear Voltammetry, Cyclic Voltammetry, Pulse Voltammetry, Potentiostatic EIS y Galvanostatic. Estas técnicas pueden ejecutarse separadamente o combinarse.

El *VoltaLab™ 32 Electrochemical Laboratory* se basa en la medida de una intensidad de corriente que se desarrolla en una celda electroquímica. La celda consta de tres electrodos sumergidos en una disolución, uno de los tres electrodos es el electrodo de trabajo, cuyo potencial se varía con el tiempo. El segundo electrodo es un electrodo de referencia cuyo potencial permanece constante durante la medida. El tercer electrodo es un electrodo auxiliar que normalmente es de platino que sirve para conducir electricidad desde la fuente a través de la disolución.

## 2.0 ANTECEDENTES Y GENERALIDADES.

### 2.1 DEFINICIÓN E IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN.

Corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente

El término herrumbrado u oxidación se aplica a la corrosión del hierro y de las aleaciones en las que éste es el metal base, en este proceso se forman productos de corrosión compuestos en su mayor parte por óxidos de hierro hidratados. Por tanto, los metales no ferrosos se corroen pero no se herrumbran. (1)

La principal causa de la corrosión es la inestabilidad de los metales en sus formas refinadas, los mismos tienden a volver a sus estados originales a través de los procesos de corrosión (20)

La importancia de los estudios de la corrosión en primer lugar figura el aspecto económico que comprende la reducción de las pérdidas del material que se producen por el desgaste progresivo o rotura repentina de tuberías, recipientes, componentes metálicos de máquinas, cascos de buques, estructuras marinas, etc ; en segundo término, hay que considerar la conservación de los recursos naturales. aplicada en principio a los metales, cuya reserva mundial es limitada, y cuyo consumo incluye las pérdidas de reservas de energía y agua que acompañan a la producción y montaje de las estructuras metálicas

El motivo principal de la investigación de la corrosión se deriva en la actualidad del factor económico. Las pérdidas que sufre la industria, el ejército, las municipalidades y otras, ascienden a muchos miles de millones de dólares al año. (1)

La corrosión es esencialmente un proceso electroquímico que origina parte o el total del metal que está transformándose del estado metálico al iónico. La corrosión requiere un flujo de electricidad entre ciertas áreas de la superficie de un metal a través de un electrólito, el cual es cualquier solución que contiene iones. Para completar el circuito eléctrico, debe haber dos electrodos, un ánodo y un cátodo, mismos que deben conectarse. Los electrodos pueden ser dos diferentes clases de metales o distintas áreas sobre la misma pieza de metal. Para que fluya la electricidad, debe haber una diferencia de potencial entre los electrodos (20)



## 2.2 TIPOS DE CORROSIÓN

Los tipos principales de corrosión clasificados por su aspecto externo o por las alteraciones que causan en las propiedades físicas de los metales son los siguientes.

### CORROSIÓN UNIFORME

La disminución uniforme del volumen de un metal por la acción química (electroquímica), acción que generalmente entraña la formación de los productos solubles, se denomina corrosión general o uniforme. Este tipo de corrosión es uniforme con respecto al tiempo, el metal es convertido en productos solubles de la corrosión con un ritmo constante, y el ataque puede predecirse, en cierto grado controlarse. Por otro lado, cuando la superficie y el medio no son uniformes, el ataque no es general, se concentra en zonas locales y origina una picadura más o menos intensa u otras formas de ataque local. No existe ninguna división clara entre las dos formas. Se mide en pulgadas de penetración por año y miligramos por decímetro cuadrado. Estas unidades se refieren a la penetración en el metal y a la pérdida de peso del mismo, excluyendo cualesquiera productos de corrosión adherentes o no adherentes formados en la superficie. Incluye los tipos de corrosión tan conocidos como la formación de herrumbre en el hierro, el empañado de la plata y la oxidación de los metales a alta temperatura.(1, 2)

### CORROSIÓN DE PICADURA

Tipo de ataque local que se forma debido a que la velocidad de la corrosión es mayor en unas zonas que en otras. Se forman picaduras u hoyos, que penetran en el metal en lugar de extenderse sobre la superficie, de lo que resulta el deterioro por deformación, aunque sólo es afectada una parte pequeña del metal. A diferencia de la corrosión uniforme, la picadura es difícil de evaluar y controlar, porque no es uniforme con respecto a la superficie ni su rapidez es constante en el tiempo. En realidad, el índice de corrosión en algunas picaduras puede disminuir con el tiempo y la corrosión se concentra en los sitios activos restantes con el siguiente aumento en la *intensidad y la rapidez del deterioro. En ocasiones se expresa la profundidad* de las picaduras por término factor de picadura. Este factor es la relación de la penetración máxima producida en el metal a la penetración media determinada por la pérdida de peso de la muestra. Muchos metales cuando están expuestos a líquidos que se mueven a velocidades elevadas sufren una corrosión del tipo de picaduras llamada ataque por *cavitación*. Por ejemplo, los tubos de condensadores de cobre y de latón están sujetos a este tipo de ataque (1, 2)

La *cavitación* se produce por la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie dinámica de contacto metal-líquido tal como en rodetes impulsores de bombas o en las caras posteriores de las hélices y causa una serie de picaduras que algunas veces se asemejan a un panal de fisuras de pequeña profundidad relativa (1)

## CORROSIÓN SELECTIVA

En las aleaciones de dos o más metales es posible que ocurra la eliminación selectiva de un componente quedando los demás. Así, el latón rico en cinc sufre la llamada "descincación" por la cual es lixiviado el cinc y queda una masa porosa de cobre casi puro. Esto puede producirse localmente o en toda la superficie. A veces sucede que una tubería de latón se transforma en una masa porosa de cobre y la zona afectada es visible por el color rojo que reemplaza al amarillo del latón

El descincado es un tipo de ataque que ocurre en las aleaciones de cinc. La corrosión selectiva es similar al descincado en que uno o más componentes reactivos de la aleación se corroen preferentemente, dejando un residuo poroso que puede conservar la formación primitiva de la aleación. Este tipo de corrosión es limitado por lo general, a las aleaciones de los metales nobles, como Au-Cu y Au-Ag, se emplea prácticamente para refinar oro. La concentración del medio corrosivo define si sólo se disolverá el componente menos noble por sustitución, los dos casos se ven el latón, de que los ácidos débiles, como el acético, disuelven solamente al cinc, y los ácidos fuertes, como el clorhídrico, disuelven el cinc y el cobre.(2)

## CORROSIÓN INTERGRANULAR

Es un tipo de ataque localizado, que ocurre en los espacios que limitan los granos de un metal y que producen pérdidas de la resistencia mecánica y de la ductibilidad provocado generalmente por los tratamientos térmicos, se distingue de la corrosión por picadura por el hecho de que dependen directamente de la estructura metálica y de las condiciones que prevalecen en los límites entre los granos y en los planos de deslizamiento

La corrosión intergranular se produce por las diferencias locales de concentración en los componentes de la aleación en los límites de los granos, a consecuencia de los tratamientos térmicos y de la precipitación subsiguiente

Una corrosión semejante en los límites de los granos se produce en el acero inoxidable 18-8 después de un tratamiento térmico inadecuado o por calentamiento local durante la soldadura autógena. Se precipita carburo de cobre en los límites de los granos, y de esta manera pierde cromo la solución sólida

La condición primordial para la corrosión intergranular es una diferencia en la concentración de la aleación en los límites de los granos. De ello se deduce que cualquier aleación que se endurezca con el transcurso del tiempo o una aleación en la cual la precipitación preferencial produzca una disminución local de la pasividad en los límites de los granos, puede hacerse susceptible a la corrosión intergranular por un tratamiento térmico, otros ejemplos son las aleaciones de cobre-berilio y de cromo-hierro-manganeso (2)

## GRIETAS PRODUCIDAS POR LA CORROSIÓN DEBIDA A LAS TENSIONES

Si un metal en un medio corrosivo específico y aun esfuerzo o tensión de tracción constante se agrieta de inmediato o después de un tiempo dado, el fallo se denomina agrietamiento por corrosión bajo tensiones. La tensión puede ser residual del metal como la producida por la conformación en frío o por los tratamientos térmicos, o puede ser una tensión aplicada exteriormente.(1)

Estas grietas se distinguen de la corrosión intergranular por el hecho de que las tensiones internas residuales o aplicadas, son una parte integrante del mecanismo. Las grietas debidas a este tipo de corrosión no se producen en ausencia de tensiones internas, mientras que la corrosión intergranular sí se produce, incluso cuando el metal está sometido a esfuerzos de compresión. Otra característica que distingue las grietas producidas por la corrosión debida a tensiones internas es el medio altamente selectivo necesario para producir el efecto por otro lado, la corrosión intergranular sólo exige un electrólito en que las fases mantienen sus polaridades anódica y catódica respectivas, y muchos medios corrosivos satisfacen esta condición. Los principales factores que intervienen en la acción combinada de las tensiones y la corrosión son. 1) la magnitud y la dirección de la tensión, 2) el medio, 3) la estructura y la composición de la aleación (2)

## CORROSIÓN POR FATIGA

Es un caso de la acción simultánea del medio y las tensiones, pero se distingue por el carácter cíclico de la tensión. La superficie del metal desempeña un papel importante en esta forma de daño, puesto que será la que soporte los mayores esfuerzos y, al mismo tiempo, estará sometida a los ataques de los medios corrosivos. La corrosión por fatiga se caracteriza por la fractura transcristalina en todos los metales, salvo el plomo, y está asociada a bandas de deslizamiento que se forman durante los esfuerzos cíclicos del trabajo en frío. Pueden distinguirse dos fases 1) la acción combinada de las tensiones y de la corrosión daña el metal por la formación de picaduras y grietas; 2) se produce el deterioro por propagación

de las grietas, que es acelerada por la concentración de las tensiones en la base de la grieta

La formación de una picadura redondeada de corrosión o de una grieta transcrystalina está posiblemente asociada a un mecanismo de deslizamiento, originándose este último entre planos de deslizamiento por la desorganización estructural o por precipitación local causada por las tensiones.(2)

## CORROSIÓN GALVÁNICA

Tiene una velocidad de corrosión por encima de lo normal, que se asocia con el flujo de corriente a un metal menos activo (cátodo) en contacto con un metal más activo (ánodo) en el mismo ambiente.

Sin embargo, como regla general, cuando se utilizan metales distintos en contacto unos con otros y se exponen a una solución conductora de la electricidad, se tienen que escoger combinaciones de metales que se acerquen todo lo que sea posible a la serie galvánica. En general, el acoplamiento de dos metales muy separados en esa serie producirá un ataque acelerado en el metal más activo. No obstante con mucha frecuencia, las películas protectoras de óxido y otros efectos tendrán a reducir la corrosión galvánica. Por supuesto, la corrosión galvánica se puede evitar aislando los metales uno del otro. Por ejemplo cuando se atornillan placas juntas, se pueden utilizar arandelas de plástico diseñadas especialmente. En el mecanismo general de la corrosión, los factores que intervienen son: 1) las características de polarización del ánodo y del cátodo; 2) los potenciales relativos, o la diferencia de potencial del ánodo y el cátodo, en el electrolito, 3) la resistencia de la pila formada por el electrolito y el circuito metálico. Son factores secundarios las superficies relativas del ánodo y el cátodo, las características del electrolito y la presencia o la ausencia de movimiento, luz y otras variables de la corrosión (2)

La relación de área en la corrosión es muy importante. La corrosión se debe a un flujo de corriente del ánodo al cátodo o del metal más activo al metal menos activo. Una relación de área desfavorable es la de un cátodo grande y un ánodo pequeño. La corrosión del ánodo puede ser de 100 a 1000 veces mayor que si fueran áreas iguales. Esta es la razón por la cual los aceros inoxidable son propensos a picarse con rapidez en algunos ambientes. Los remaches de acero en una placa de cobre se corroerán mucho más que una placa de acero con remaches de cobre.(3)

## CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA

La corrosión microbiológica incluye todo fenómeno de destrucción en el cual los microorganismos, ya sea que actúen directamente o por medio de las sustancias provenientes de su metabolismo, que desempeñan un papel importante al acelerar un proceso ya establecido o al crear las condiciones favorables para que se produzca dicho fenómeno.

En la actualidad no existe lugar a dudas en cuanto a deterioros de materiales de gran resistencia, se deben en parte a la acción de microorganismos, por esto es el desarrollo de este trabajo sobre este tema en particular (4)

La actividad metabólica de los microorganismos pueden provocar ya sea directa o indirectamente un deterioro del metal por proceso de corrosión. Esa actividad puede 1) producir un ambiente corrosivo, 2) crear celdas de concentración electrolítica en la superficie del metal, 3) modificar la resistencia de la películas superficiales, 4) tener influencia sobre el índice de reacción anódica o catódica y 5) modificar la composición ambiental.

Los microorganismos que se asocian a la corrosión son de dos tipos: aeróbicos y anaeróbicos. Los microorganismos aeróbicos crecen con facilidad en un ambiente que contenga oxígeno, mientras que las especies anaeróbicas crecen en un ambiente virtualmente desprovisto de oxígeno atmosférico (3)

Existen ciertas bacterias que pueden soportar dosis muy fuertes de cloro, como es el caso de las bacterias sulfatorreductoras, que no sufren alteraciones al estar en contacto con concentraciones de 20 p.p.m. de dicho elemento. Estas bacterias son susceptibles de desarrollarse directamente en el medio ambiente, o bien, son capaces de permanecer en estado latente en él y así esperar a que se produzcan las condiciones favorables para su proliferación.(4)

## 2.3 CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA

### 2.3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS.

#### LAS FERROBACTERIAS

Estas obtienen la energía necesaria para su desarrollo a partir de la transformación de las sales ferrosas en sales férricas, es decir, metabolizan el hierro teniendo la posibilidad de extraer el hierro ferroso contenido en los medios acuosos y depositarlo en forma de hidróxido férrico hidratado, el cual aparece como una especie de secreción de consistencia mucilaginosa

Es importante que estos microorganismos tienen también la posibilidad de metabolizar las sales de manganeso que forman un limo pardusco

La presencia de ferrobacterias en el punto en que el metal ha sufrido el ataque va a ocasionar la movilización de los iones ferrosos y su transformación en sales férricas.

Finalmente, ciertas bacterias tienen la capacidad durante el curso de su propio desarrollo modificar el medio ambiente, ya sea ayudando a la disolución o bien, al depósito de sales de hierro, sin utilizar las sales ferrosas como fuente de energía (4)

## BACTERIAS SULFATO-REDUCTORAS

Bacterias anaerobias, que se encuentran bajo las capas de herrumbre que se hallan en contacto con el metal, ahí donde no llega el oxígeno. Estas bacterias transforman los sulfatos en ácido sulfhídrico, el cual se combinará con las sales ferrosas para dar un sulfuro negro. Se ha comprobado que, además de afectar a los metales ferrosos, el ácido sulfhídrico ejerce su acción corrosiva de manera muy especial en las tuberías de plomo, independientemente de que éstas se encuentren o no bajo tierra (4)

Las bacterias reductoras de sulfatos reducen con facilidad los sulfatos inorgánicos a sulfuros en presencia de  $H_2O$  materia orgánica, proceso que se facilita por la presencia de una superficie de hierro. La ayuda que presta el hierro en esta reducción es probable que consista en suministrar el hidrógeno que en circunstancias normales es adsorbido sobre la superficie del metal y que las bacterias utilizan en la reducción del  $SO_4$ .

Se han encontrado daños graves producidos por las bacterias reductoras de sulfatos, en especial en tuberías de revestimiento en pozos de petróleo, conductos enterrados, cilindros de laminación refrigerados por agua y en tuberías de pozos de agua profundos (4)

La cloración (no se puede aplicar en todas las aleaciones ferrosas) es un medio de reducir el daño que causan estas bacterias, la aireación de las aguas también reduce la actividad de las bacterias, ya que en presencia de  $O_2$  disuelto no pueden desarrollarse (4)

## SULFOBACTERIAS

Estas bacterias metabolizan el azufre a partir de compuestos azufrados reducidos y los expulsan al medio ambiente o lo almacenan dentro de su célula, o bien, lo oxidan, lo mismo que sus compuestos, con formación de productos ácidos ( $H_2SO_2$ ).

En el primero de estos casos habrá una formación de lodos. En el segundo caso se producirá una acidificación corrosiva con modificación importante del pH del medio (4)

## LACTOBACILLUS

Bacilos, generalmente largos y delgados, que en la mayoría de las especies forman cadenas. Fermentan los azúcares dando ácido láctico como producto principal, pequeñas cantidades de ácido acético, CO<sub>2</sub>

Los lactobacilos son interesantes en los alimentos por las siguientes características. 1) fermentan los azúcares, produciendo cantidades considerables de ácido láctico, lo que permite su empleo en la elaboración de productos fermentados vegetales y lácteos, y en la elaboración industrial de ácido láctico, pero son perjudiciales para otros productos, por ejemplo, vino o cerveza; 2) la producción de gas y de otros productos volátiles por las especies heterofermentativas que a veces perjudica la calidad de algunos alimentos; 3) su imposibilidad de sintetizar la mayoría de las vitaminas que necesitan, lo que les impide crecer bien en alimentos pobres en vitaminas (17, 18)

### 2.3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN.

#### EL ESTADO EN QUE SE ENCUENTRA EL MATERIAL

Este aspecto es muy importante, las alteraciones de la superficie (por mínimas que éstas sean) o el trabajo mecánico que haya llevado el metal corresponden a factores que permiten que se inicie el proceso de corrosión. Una vez iniciado el fenómeno se observa la acción que posteriormente desempeñan las bacterias. (4)

#### LA COMPOSICIÓN DEL MEDIO

La composición química del agua desempeña una función de primer orden. El contenido de oxígeno y de gas carbónico en ésta llevará a la formación de óxidos y de carbonatos, especialmente en los puntos que presentan deterioro. Además, el oxígeno favorecerá el desarrollo de los microorganismos aerobios y, por otra parte, el gas carbónico servirá como fuente de carbono a las bacterias autótrofas. Cada microorganismo tiene una temperatura óptima en la cual su desarrollo se acelera, y dicha temperatura se encuentra por lo general alrededor de 25° a 30° C por el contrario, ciertas esporas pueden resistir temperaturas mucho más bajas o mucho más elevadas.

La acidez o la alcalinidad del medio tienen en principio una acción directa sobre el metal y luego, de acuerdo con el grado que presentan, favorecen o inhiben el desarrollo de las bacterias

La luz condiciona el desarrollo de las bacterias fotolitótrofas, y, asimismo, de las fotoorganótropas (4)

## LOS MICROORGANISMOS

Además de las bacterias es preciso citar a los hongos organismos heterótrofos que pueden causar importantes daños provocados por sus actividades enzimáticas, las cuales se manifiestan por el deterioro biológico de los derivados celulósicos o plásticos, de cuyos productos pueden hacerse cargo algunas bacterias. En el medio los hongos secretan, además numerosos ácidos orgánicos. Las algas son organismos autótrofos que se desarrollan en presencia de la luz. Organismos que proporcionan la materia orgánica necesaria para el crecimiento de los otros organismos.(4)

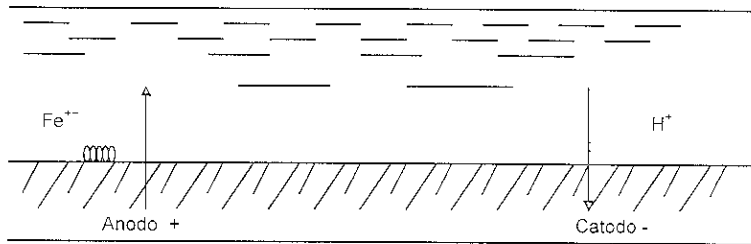
### 2.3.3 MECANISMO DE LA CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA. (4)

Entre los puntos en los que el metal presenta imperfecciones se forman diferencias de potencial las cuales provocan el paso de corriente a través del metal y del líquido que se encuentra entre esas diferentes partes del metal.

En las zonas anódicas, la corriente pasa del metal al líquido y por el contrario, en las zonas catódicas, la corriente pasa del líquido al metal. De este modo se observa una disolución del metal en el ánodo y la formación de hidrógeno en el cátodo en medio ácido

En condiciones normales, al desprenderse el hidrógeno que se encuentra en el cátodo, permanece suspendido en la superficie del metal, en forma de película a escala molecular, y de este modo se crea un potencial de oposición suficiente para neutralizar el proceso de corrosión. Este fenómeno corresponde a la *polarización*.





De esta manera al principio se produce una ligera corrosión anódica con solución del hierro en forma de sales ferrosas que pronto se oxidan en sales férricas por efecto del oxígeno del agua.

Al polarizarse los elementos la corrosión se suspende. En esta etapa del proceso se observa una ligera capa de herrumbre que no afecta al metal y dicho estado de equilibrio puede durar mucho tiempo, en tanto que el oxígeno no movilice el hidrógeno que se encuentra en el cátodo.

De hecho, toda sustancia o mecanismo que utilice el hidrógeno catódico despolarizará el sistema y la corrosión ocurrirá de nuevo.

Es al llegar a esta etapa, cuando intervienen las ferrobacterias y las bacterias sulfatoreductoras.

En la parte correspondiente al ánodo las ferrobacterias obtienen su energía de la transformación de sales ferrosas en sales férricas y provocan la formación acelerada del herrumbre, con lo cual rompen en forma continua el equilibrio por despolarización anódica y catódica simultáneamente. Este proceso produce la disolución continua del metal y llega hasta la perforación del mismo.

En la parte correspondiente al cátodo las bacterias sulfatoreductoras movilizan el hidrógeno y provocan una despolarización catódica.

## 2.4 MÉTODOS PARA EL ESTUDIO DE LA CORROSIÓN.

En ocasiones es necesario medir las velocidades de corrosión por diversas razones de las cuales los dos más importantes son a) auxiliarse en la selección del material de construcción más apropiado en la etapa de diseño y b) permitir el monitoreo del desgaste metálico durante el servicio (6)

Los tipos principales de pruebas son

- 1 La experiencia operacional real con equipos de plantas a escala completa expuestos al medio corrosivo.
- 2 Experiencia con equipos de plantas en pequeña escala, ya sea en condiciones comerciales o de planta piloto
- 3 Pruebas de muestras sobre el terreno que incluyen muestras de acero, muestras esforzadas, sondas de resistencia eléctrica expuestas al medio de corrosión de la planta o muestras expuestas a la atmósfera, a tierras o aguas dulces, salobres o saladas
4. Pruebas de laboratorio con pruebas expuestas a líquidos de plantas reales o ambientes simulados

Las pruebas de corrosión en la planta o sobre el terreno son útiles para:

1. Selección del material más apropiado para resistir un ambiente dado y estimar su durabilidad probable en ese ambiente.
- 2 Estudio de la eficacia de los medios para evitar la corrosión (3)

### 2.4.1. MÉTODOS DE PRUEBA.

#### POTENCIAL DE CORROSIÓN

La medición del potencial de corrosión se realiza mediante un voltímetro de alta impedancia conectado al metal y con un electrodo de referencia adecuado sumergido en el electrólito. Puede realizarse la medición utilizando electrodos estándares como el electrodo de calomel saturado o el electrodo de sulfato de cobre saturado, el potencial de corrosión llamado así porque implica el desgaste superficial, es el potencial adoptado mutuamente por los electrodos oxidantes/reductores.(6)

## MÉTODO DE RESISTENCIA ELÉCTRICA

Si una muestra de prueba de corrosión está en la forma de fleje o alambre delgado, su resistencia eléctrica aumenta, a medida que la corrosión disminuye su sección transversal. Por consiguiente, se puede utilizar, para vigilar la corrosión, una medición periódica o continua de la resistencia. La medición de la resistencia eléctrica no tiene ninguna relación con la electroquímica de la reacción de corrosión. Se limita a medir una propiedad volumétrica, que depende del área de la sección transversal del espécimen. Existe para ello instrumentos comerciales. (3)

## MÉTODO DE POLARIZACIÓN LINEAL

Las sondas electroquímicas son también útiles para las mediciones en las plantas. La polarización lineal (o la resistencia a la polarización) da el índice de corrosión en un minuto, aproximadamente, sin necesidad de ninguna medición anterior. Se mide la cantidad de corriente externa necesaria para modificar en unos cuantos milivolts (por lo común 10 mV) el potencial de corrosión de un espécimen que se corroe libremente. Esta corriente se relaciona con la de corrosión y, por consiguiente, con el índice de corrosión de la muestra. (3)

## MÉTODO DE EXTRAPOLACIÓN DE TAFEL

La extrapolación de las rectas de Tafel, anódica y/o catódica correspondientes a una reacción de corrosión controlada por transferencia de carga, permite determinar la intensidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ). La rapidez de corrosión puede calcularse de la siguiente manera:

$$RC \text{ (mm/año)} = 3223.413 \times i_{corr} / D$$

Donde:

RC = Rapidez de Corrosión

$i_{corr}$  = Intensidad de corriente de corrosión ( $A/cm^2$ )

D = Densidad del material en estudio ( $gramos/cm^3$ )

3223.413 = Peso Equivalente del metal en estudio (Fe) entre la constante de Faraday por el área del electrodo. (14)

Las rectas de Tafel anódica y catódica están descritas por la ecuación de Tafel.

$$\delta = b \log I / I_{\text{corr}} \quad \text{ó} \quad \delta = b (\log I - \log I_{\text{corr}})$$

$$\delta = b \log I - b \log I_{\text{corr}}$$

siendo  $\delta$  = sobrepotencial.

$b$  = pendiente.

$I$  = intensidad de corriente

considerando  $b \log I_{\text{corr}} = K$ , tenemos que:

$$\delta = b \log I - K$$

La ecuación anterior corresponde a la forma general  $y = bx + a$ . La representación gráfica de  $\delta$  vs  $\log I$  es una línea recta de pendiente  $b$  y ordenada al origen  $K$ .

Las pendientes de Tafel anódica y catódica,  $b_a$  y  $b_c$  pueden determinarse de las ramas anódica y catódica de la representación gráfica de  $\delta$  vs  $\log I$ , que por lo general se expresa en unidades de mV/A.

La ecuación de Tafel es una aproximación de la ecuación general de una reacción electroquímica controlada por el proceso de transferencia de carga. Las curvas de polarización pueden obtenerse en estado estacionario, en condiciones galvanostáticas o potencioestática, polarizando el electrodo hasta potenciales  $\delta$  mayores que  $RT / F$ . Debido precisamente a esta elevada polarización aplicada al electrodo de trabajo ( $\pm 200$  mV), es posible que puedan tener lugar cambios irreversibles, por lo cual este método es de valor limitado para propósitos de control de la corrosión, aunque en diversos sistemas que presentan corrosión uniforme en medio ácido, las velocidades de corrosión determinadas por este método presentan una buena concordancia con los resultados por las mediciones de pérdida de peso.<sup>(6)</sup>

## MÉTODO DE IMPEDANCIA FARADAICA.

Consiste en imponer al sistema en corrosión, una señal de corriente alterna (sinusoidal) entre 10 y 20 mV de cresta a cresta, con una amplia variedad de frecuencia todos los procesos son lentos y rápidos. Sin embargo, al aumentar la frecuencia desaparece la contribución de los procesos más lentos que no tienen tiempo para desarrollarse antes de la inversión de polaridad de la señal de corriente alterna. La obtención del diagrama de impedancia en el más amplio dominio de frecuencias constituye, entonces, un examen analítico, una especie de firma espectral de los diversos procesos que, de otra manera intervienen y se manifiestan global y simultáneamente en una sollicitación por corriente continua del sistema estudiado. (14)

## MÉTODOS FÍSICOS

La inspección visual es la forma más rápida y obvia de estimar el curso de la corrosión. La cuantificación de la corrosión por lo general es medir la pérdida de peso después de cierto tiempo, pueden realizarse determinaciones simples en el laboratorio. Cuando la corrosión no es uniforme como la corrosión por picaduras y agrietamiento; la incidencia (frecuencia) de picaduras puede evaluarse fácilmente contando el número de picaduras en áreas representativas de la superficie. Luego se puede dibujar un perfil de distribución (número de picaduras por unidad de áreas vs diámetro de picadura) y evaluar el progreso de la corrosión mediante los cambios en 1) diámetro de picadura más grande, 2) diámetro de picadura más frecuente, 3) número de picaduras por unidad de área (6)

## 2.5 PELÍCULAS SUPERFICIALES DE PASIVACION.

### 2 5 1 CONDICIONES QUE FAVORECEN LAS PELÍCULAS

Quando las condiciones de pH y potencial son las apropiadas, se desarrollan películas superficiales de óxido o de hidróxido que frenan la corrosión e incluso pueden detenerla por completo. Hay que señalar que tales películas pueden ser discontinuas, heterogéneas y sobre todo, muy delgadas (2 - 10 nm).

La película "pasiva" que se forma espontáneamente sobre el hierro consiste de un óxido complejo que se aproxima a  $Fe_3O_4$  y  $Fe_2O_3$  en sus superficies interior y exterior, respectivamente, y el conjunto es estabilizado debido a una capa absorbida de moléculas de oxígeno.

Es claro que la primera etapa en la formación de tal película compleja es la adsorción del oxígeno. si bien ésta es seguida rápidamente (después de unos cuantos segundos), por reacciones de oxidación hasta que se frena el crecimiento debido a la resistencia eléctrica que ofrece la película.

La película engrosa un poco más a lo largo de un periodo grande (varios días), pero el periodo más importante es durante los primeros minutos, que es cuando el espesor alcanza unas cuantas capas atómicas (6)

## 2.5.2 PELÍCULAS SUPERFICIALES Y POLARIZACIÓN.

Las películas "pasivas" son lo suficientemente delgadas que, si bien sirven como una barrera iónica más o menos efectiva entre el metal y el electrolito, permiten el paso de electrones por el efecto de túnel (electrón tunnelling) y mantienen las reacciones catódicas tales como la reducción del oxígeno o la reducción de protones. Lo que es más, estas películas no presentan las propiedades semiconductoras volumínicas de los óxidos simples, sino que tienden a tener un comportamiento metálico. (6)

El carácter semiconductor residual tiene dos efectos. El primero es disminuir la concentración de electrones en la doble capa eléctrica, lo cual aparentemente disminuye la densidad de corriente de intercambio  $i_0$ . El segundo efecto es más significativo: un aumento en la pendiente de Tafel. La teoría es como sigue:

Primero se supone que el potencial individual se desarrolla a través de la película misma y a través de la doble película localizada en la interfase película/solución, pero que la diferencia de potencial a través de la interfase metal/película es despreciablemente pequeña. Esto quiere decir que, detiene la reducción de protones en la superficie de la película: el sobrepotencial que promueve el proceso puede dividirse en dos diferencias de potencial (6)

## 2.6 METALURGIA DEL HIERRO.

El hierro es el elemento más económico y el más usado en el ramo de la ingeniería y por lo tanto, el más importante en la era actual. Debido a su casi nula resistencia a la corrosión atmosférica en condiciones normales, es muy difícil encontrarlo en estado nativo en la corteza terrestre. Se supone que grandes cantidades de este elemento se encuentran en la magma terrestre, asociado con otros metales pesados. En forma de meteoritos se ha encontrado en diversos lugares del planeta, casi siempre asociado con níquel y otros elementos (7)

Los principales minerales de obtención son: Hematita,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , sesquióxido de hierro; es el principal y el más abundante de color rojo sangre.

Magnetita,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , óxido ferroso-férrico de color negro y magnético, suele llamársele también piedra de imán, es el mineral más rico en hierro, se encuentra en abundancia en los casquetes polares

Siderita,  $\text{FeCO}_3$ , carbonato de hierro, es poco abundante y el más pobre en contenido de hierro. Otro mineral, considerado como indeseable e incosteable para su extracción es la pirita,  $\text{FeS}_2$ , sulfuro de hierro de color amarillo brillante, hasta rico en azufre y pobre en hierro

El carbono puede estar contenido en dos formas esenciales: como grafito o carbono libre, o bien, como elemento combinado formando carburo de hierro  $\text{Fe}_3\text{C}$  (Cementita). Cuando el carbono está en forma de grafito, el hierro colado tiene fractura de color gris, es muy suave y falto de ductilidad y altamente maquinable. Si el carbono se encuentra combinado como carburo de hierro, su fractura es blanca; es muy duro y muy frágil con 0% de maquinabilidad. (7)

## 2.7 CLASIFICACIÓN DE LAS ALEACIONES HIERRO-CARBONO. (3 7 19 20)

Las aleaciones hierro-carbono se clasifican de acuerdo con su contenido de carbono.

### EL HIERRO DULCE

Aleación hierro-carbono que resulta de la alta refinación del hierro blanco, mediante procesos llamados de pudelado o proceso de Aston y Byers. Con estos tratamientos se logra una aleación cuyo análisis químico es más o menos como sigue: 0.04% o menos de Carbono, 0.05% o menos de Manganeso, 0.10 a 0.15% de Silicio, 0.09 a 0.12% de Fósforo, 0.03% o menos de Azufre, resto de Fe. Este producto por su buena resistencia a la fatiga, plasticidad y soldabilidad, se utiliza para la fabricación de pernos, remaches, tornillos, láminas, alambres, placas resistentes a cierto tipo de corrosión y en cadenas con resistencia al impacto con buena soldabilidad.

## EL ACERO

Es la aleación hierro-carbono conteniendo desde 0.06 hasta 1.7 % de Carbono. Es el metal más adecuado, común y barato que se emplea en la industria. Es el más soldable de todos los metales comerciales. Tiene las dos terceras partes del peso del plomo y es tres veces más pesado que el aluminio.

La resistencia a la corrosión del acero depende de la formación de una película superficial de óxido. Sin embargo, la resistencia a la corrosión está limitada. No se debe utilizar acero al carbono en contacto con ácidos diluidos.

El acero se ve poco afectado por el agua neutra y los productos químicos orgánicos. Muchos tanques de agua grandes se fabrican con acero al carbono, así como también tanques de almacenamiento para disolventes orgánicos y productos similares.

## HIERRO FORJADO.

El metal ferroso que incluye una cantidad diminuta y uniformemente distribuida de silicato de hierro (escoria) se denomina hierro forjado. La escoria existe como fase discreta y separada, en la forma de fibras de silicato. El hierro de forja es duro y dúctil. La resistencia a la corrosión es un poco mejor que la del acero al carbono. Tienen una resistencia excelente a la corrosión atmosférica (aplicaciones estructurales) y la corrosión del suelo (líneas de agua). Una de las teorías es que las fibras de silicato tienden a obstaculizar los ataques corrosivos y a evitar la formación de picaduras.

El hierro forjado puede manejar sin dificultad álcalis y soluciones alcalinas, sin embargo, los ácidos diluidos provocan fallas rápidas.

## ACEROS DE BAJA ALEACIÓN.

Los aceros de baja aleación contienen uno o más agentes de aleación para mejorar las propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión por encima de las del acero al carbono.

El níquel aumenta la solidez y mejora las propiedades a bajas temperaturas y la resistencia a la corrosión. El cromo y el silicio, mejoran la dureza, la resistencia a la abrasión, la resistencia a la corrosión y la resistencia a la oxidación. El molibdeno proporciona resistencia a las temperaturas elevadas.

La adición de cantidades pequeñas de materiales de aleación mejora considerablemente la resistencia de corrosión en los ambientes atmosféricos pero no tienen muchos efectos contra los corrosivos líquidos.



Los elementos de la aleación producen una película de herrumbre apretada, densa y adherente, pero en las soluciones ácidas o alcalinas es equivalente a la del acero al carbono.

## HIERROS COLADO GRIS

Contiene carbono, silicio, manganeso y hierro. Se encuentra presente carbono, 1.7 a 4.5%, como carbono combinado y grafito: el carbono combinado se dispone en la matriz como carburo de hierro (cementita), mientras que el grafito libre aparece como grumos delgados y dispersos por todo el cuerpo del metal. El hierro gris tiene propiedades amortiguadoras sobresalientes o sea, capacidad para absorber vibración, además de una gran resistencia al desgaste, sin embargo, el hierro gris es frágil y tiene baja resistencia los choques y los impactos. Su capacidad para el maquinado es excelente y las piezas vaciadas de hierro gris se pueden soldar con técnicas adecuadas y precalentamiento.

El hierro gris es resistente a los ácidos concentrados (nitríco, sulfúrico, fosfórico), así como también a algunas soluciones alcalinas y cáusticas. Los crisoles de fusión cáustica se hacen, por lo común, de hierro colado gris con bajo contenido de silicio: las válvulas, las bombas y las tuberías de hierro colado son comunes en las plantas de ácido sulfúrico.

## HIERRO COLADO BLANCO

Es frágil y difícil de maquinar. Se hace mediante el control de la composición y el índice de solidificación del hierro fundido, para que todo el carbono se encuentre presente en la forma combinada. Muy resistente a la abrasión y el desgaste, el hierro colado blanco se usa para recubrimientos y para hélices de bombas, dados y bolas de molinos.

## HIERRO MALEABLE

Se hace con hierro colado blanco. Es hierro colado con carbono libre en la forma de nódulos dispersos. Esta configuración produce un material duro y relativamente dúctil. El carbono total es de, aproximadamente, 2.5%. La resistencia a la corrosión es aproximadamente la misma que la del hierro colado gris.

## HIERRO COLADO DÚCTIL

Incluye un grupo de materiales con buena resistencia, dureza, resistencia al desgaste y capacidad para el maquinado. Este tipo de hierro colado contiene carbono combinado y nódulos dispersos de carbono. El hierro dúctil se puede utilizar a temperaturas más altas, hasta 1100 °F.

## HIERROS COLADOS CON ALTO CONTENIDO DE SILICIO

Tienen una resistencia excelente a la corrosión. El contenido de silicio es de 13 a 16%. Esos materiales se conocen como Duriron y Corrosiron. La adición de 4% de Cr da un producto denominado Durichlor. Mientras que el alto contenido de silicio mejora la resistencia a la corrosión, reduce algunas propiedades mecánicas, en comparación con el hierro gris. Los hierros de silicio son duros y frágiles, por lo cual no soportan bien los choques y los impactos, son muy resistentes a los ambientes oxidantes y reductores y la resistencia depende de la formación de una película pasiva. Esos hierros se utilizan ampliamente en los servicios con ácido sulfúrico en todas las concentraciones, ni siquiera en el punto de ebullición.

## ACERO INOXIDABLE

Hay más de 70 tipos estándares de acero inoxidable y muchas aleaciones especiales. En general, todos tienen base de hierro, con 12 a 30% de cromo, 0 a 22% de níquel y cantidades menores de carbono, columbio, cobre, molibdeno, selenio, tántalo y titanio. Son resistentes al calor y a la corrosión. Hay tres grupos de aleaciones inoxidables: 1) martensítica, 2) ferrítica y 3) austenítica.

Las aleaciones martensíticas contienen de 12 a 20% de cromo con cantidades controladas de cromo y otros aditivos. El tipo 410 es un miembro típico de este grupo. La resistencia a la corrosión es inferior a la de los aceros inoxidables austeníticos y los aceros martensíticos se usan en general en ambientes ligeramente corrosivos (atmosférico, agua dulce y materiales orgánicos).

Los aceros inoxidables ferríticos contienen de 15 a 30% de cromo, con bajo contenido de carbono (0.1%). El contenido más alto de cromo mejora su resistencia a la corrosión. El tipo 430 es un ejemplo típico. La resistencia a la corrosión se considera buena, aun cuando las aleaciones ferríticas no son buenas en contra de los ácidos reductores como el HCl.

Los aceros inoxidable austeníticos son los más resistentes a la corrosión de entre los tres grupos. Esos aceros contienen de 16 a 26% de cromo, 6 a 22% de níquel. El contenido de carbono se mantiene bajo (0.08%) para minimizar la precipitación de carburos, son duros y dúctiles por lo que no son fáciles de maquinarse. Tiene una resistencia excelente al ácido nítrico y prácticamente a todas las concentraciones y las temperaturas. La mayoría de las plantas de ácido nítrico se construyen con el tipo 304.

#### ALEACIONES MEDIAS.

Grupo de aleaciones con una resistencia un poco mejor a la corrosión que la de los aceros inoxidable. El Durimet 20 contiene 0.07% de carbono, 29% de níquel, 20% de cromo, 2% de molibdeno, y 3% de cobre. La aleación 20 se desarrolló originalmente para satisfacer las necesidades de un material con una resistencia al ácido sulfúrico superior a la de los aceros inoxidable. Otros miembros del grupo son las aleaciones Incoloy y Hastelloy.

#### ALEACIONES ALTAS.

Contienen porcentajes relativamente grandes de níquel. Tienen una resistencia alta a todas las concentraciones de ácido sulfúrico y temperaturas altas hasta 1600 °F, en ambientes reductores y hasta 1400°F en medios oxidantes.

**2.8 NORMAS, Society of Automotive Engineers (SAE) Y American Iron & Steel Institute (AISI).**

Tanto la Society of Automotive Engineers (S.A E ) como la *American Iron & Steel Institute (AISI)*, son instituciones americanas que en lo referente a aceros, poseen un sistema numérico similar para la clasificación e identificación de éstos dando a la vez una idea aproximada de su composición química, consiste en el uso de 4 guarismos<sup>1</sup> procedidos por las siglas SAE o AISI de los cuales el primero de izquierda a derecha, indica el tipo de acero de que se trata, o sea, si es acero al carbono o aleado, el segundo guarismo, indica el porcentaje aproximado del elemento predominante, los dos últimos números indican el contenido de carbono en centésimas por ciento. Cuando el primer guarismo está representado por el número "1", indica que se trata de un acero al carbono si es "2", se trata de un acero al níquel; si es "3", se trata de un acero al cromo níquel, si es 4, se trata de un acero al cromo; etc. Tomando como ejemplo SAE 1020, de acuerdo con lo antes expuesto, nos indica que se trata de un acero al carbono con 0.20% aproximado de carbono. Otro ejemplo: AISI 2340, se trata de un acero al níquel cuyo contenido en níquel es aproximadamente 3% y alrededor de 0.40% de carbono. (7)

---

**ESPECIFICACIONES QUÍMICAS SAE-AISI  
DEL ACERO AL CARBONO 1020**

---

Composición nominal (elementos esenciales) %	Mn	Si	C	Fe
	0.45	0.25	0.20	0.10
Forma y condición	Recocido, Laminado en caliente, Endurecido.			
Densidad lb/pulg <sup>3</sup>	0.284			
Densidad Relativa	7.86			
Punto de Fusión °F	2760			
Conductividad Térmica 32° - 212 °F				
Btu/(pie <sup>2</sup> )(h)(°F)	360			

---

<sup>1</sup> Cada uno de los signos o cifras arábicas que expresan una cantidad

### 3.0 OBJETIVOS DEL TRABAJO EXPERIMENTAL.

- Aplicación de un reactor como modelo de estudio de la Corrosión Microbiológica
- Determinación de la Rapidez de corrosión por medio de las pendientes de Tafel, utilizando el equipo *VoltaLab 32 Electrochemical Laboratory*.
- Analizar la respuesta del equipo *VoltaLab™ 32 Electrochemical Laboratory* con respecto a la adaptación del reactor

### 4.0 DESARROLLO EXPERIMENTAL.

#### 4.1 MATERIAL Y MÉTODOS.

##### 4.1.1 Elaboración de las probetas

Al acero 1020 (alambre recocido), se limpia perfectamente con lija de agua No 240, se corta en 5 tramos de 1.5 cm, utilizando unas pinzas de electricista se hace un doblez en forma de argolla a cada tramo con la finalidad de poderles soldar un cable de 25 cm de largo. Se introducen en jeringas de 3 ml, a las que previamente se les selló la punta con plastilina, se agrega la resina que es una mezcla de araldita + endurecedor (20% de lo que se pesa de araldita), hasta cubrir la unión de la probeta con el cable. Después de 24 hrs se quita la jeringa a cada una de las probetas. La punta de las probetas se pulen con lija de agua No 240 (Ver fig. 1).

##### 4.1.2 Preparación de las celdas de trabajo.

Las celdas de trabajo son 2 vasos de precipitados de 600 ml a los cuales se les cortaron la parte superior. A 3 cm del borde superior les hicieron una salida con un tubo de vidrio de 1 cm de diámetro al cual se le adapta una manguera con una celda de Bausch & Lomb, para poder medir la absorbancia. Para tapar las celdas se utilizan tapones de hule con las perforaciones necesarias.

Una de las celdas es el blanco sin microorganismos y la otra con microorganismos. A los tapones de hule se les hicieron 6 perforaciones con el fin de colocar las 2 probetas, un termómetro, electrodo de referencia, electrodo auxiliar de platino, electrodo de vidrio, a cada celda (Ver fig. 2)

Celda 1 (Blanco). En un medio estéril ( ausencia de vida microbiológica), electrodos, termómetros, probetas y celda, se limpian utilizando una franela humedecida con solución de fenol al 5 %, se le añade 250 ml de cultivo rugosa, previamente esterilizado, se flamea la celda para poder colocar el tapón con los electrodos, sellar perfectamente para evitar contaminación.

Celda 2 (Problema) En un medio estéril, igual que en la celda 1; se limpia con solución de fenol al 5%, 250ml de cultivo rugosa + 0.1 ml de lactobacilos con jeringa de 1ml esterilizada, flamear, tapar y sellar.

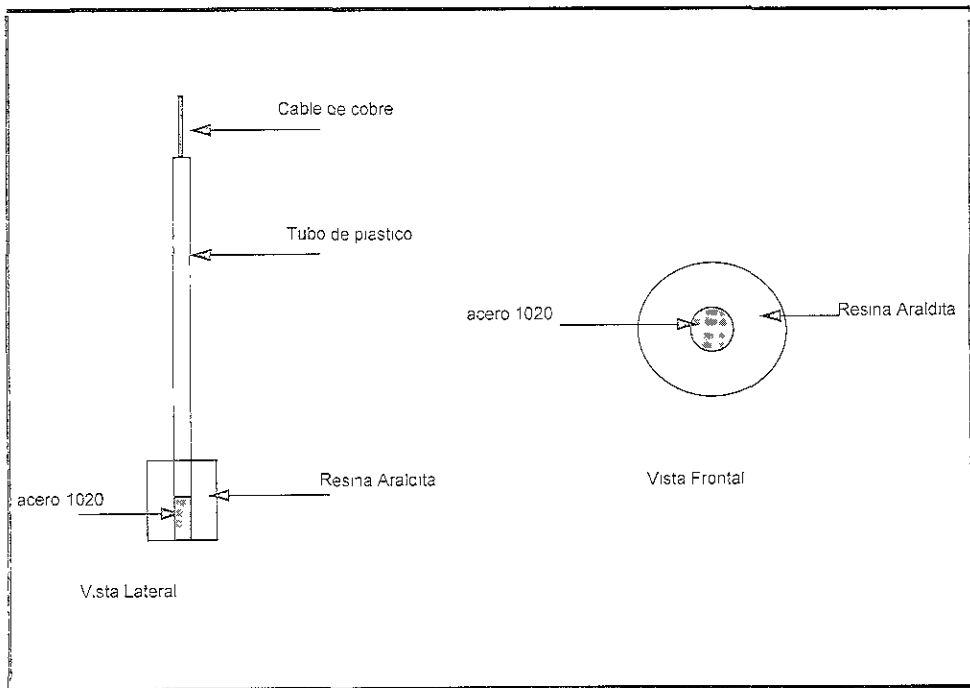


Figura 1. Probeta de acero 1020

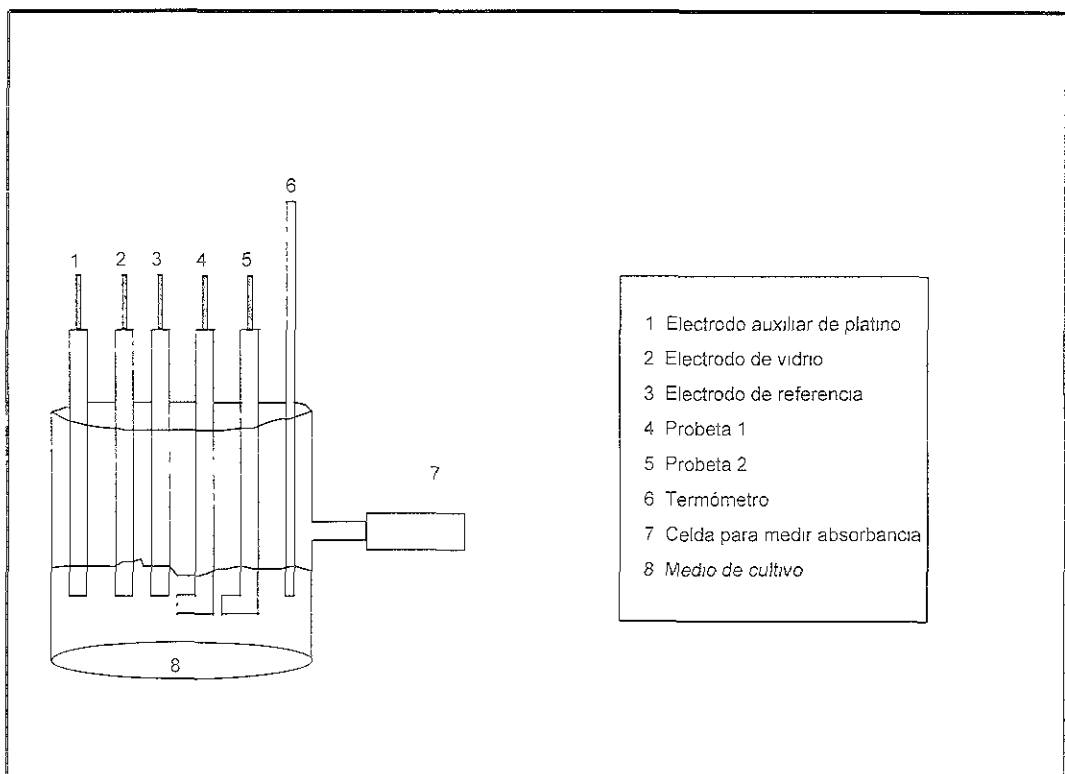


Figura 2. Celda de Trabajo

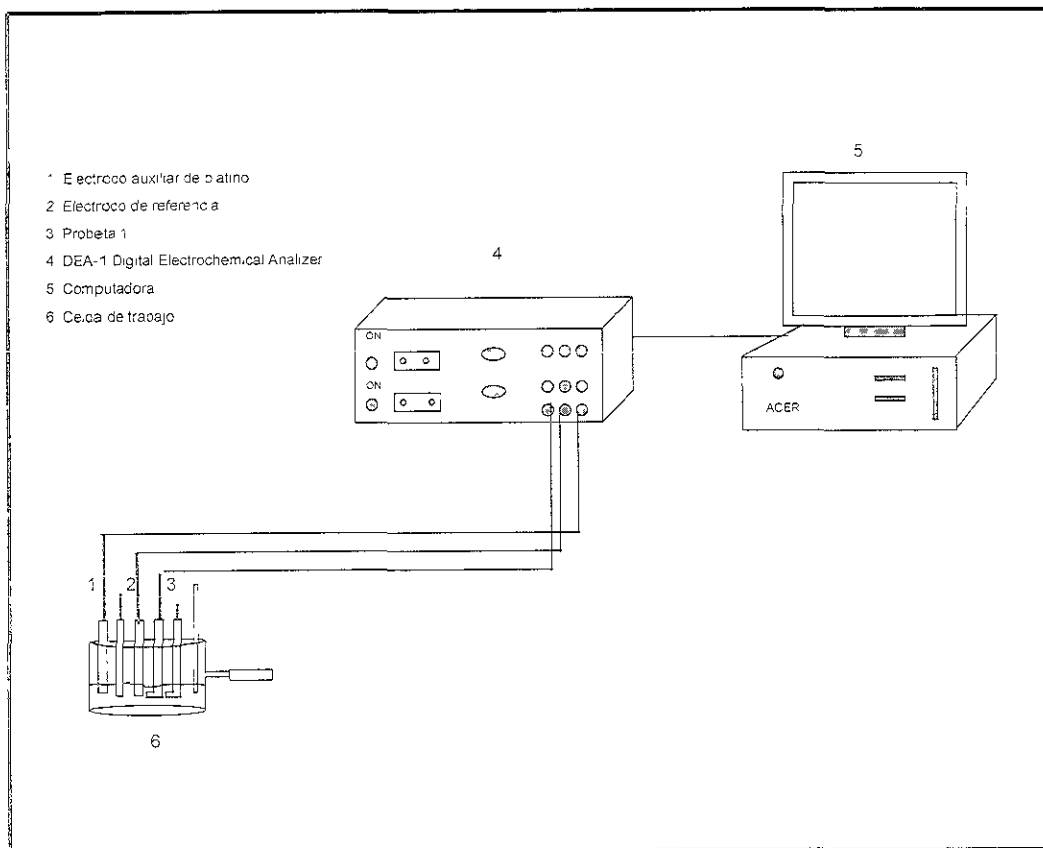


Figura 3. Conexión de la Celda de Trabajo al equipo VoltaLab 32 Electrochemical Laboratory



## 4 2 DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL DE REPOSO

1.-Se conectan los electrodos y una probeta de la celda 1, como se muestra en la figura 2, se determina el potencial de reposo con el equipo (ver fig. 3) de la siguiente manera.

2.-Encender computadora y el equipo *Electrochemical Analyzer*.

3.-Dar un clic al icono de *Radiometer Electrochemistry*, (fig 4) previamente cargado con el programa propuesto por el fabricante en la ventana de administrador de programas. Dar un doble clic en el icono *Volta Master 2 "Measurements"*

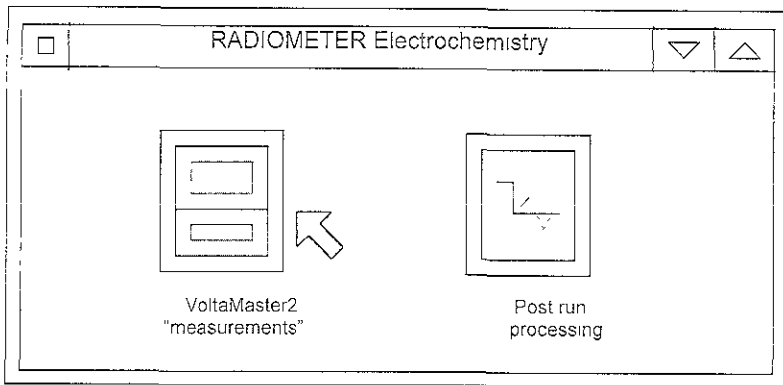


Figura 4 Icono Radiometer Electrochemistry

Esto nos lleva a la pantalla principal. Veremos que existe una línea de comandos en la parte superior de la pantalla, en donde se encuentran los menús de comandos que podemos elegir. Abajo está la barra de herramientas, por último está el área de trabajo que contiene los métodos que se pueden trabajar (fig 5)

4.-Dar un clic en *Open circuit potential* Para marcar toda la frase

5.-Dar un clic en el icono de la barra de herramientas llamado *Add an element to a sequence*, para poder pasarlo al área de *Sequence to be run* y poder continuar



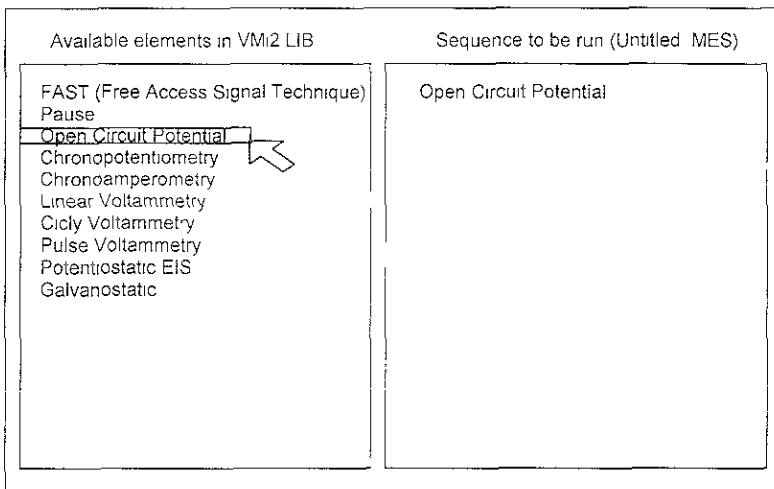


Figura 5. Área de trabajo

6 -Dar clic en el icono *Display the parameters of the selected element*. Aparecerá un cuadro de diálogo (fig. 6), en nuestro caso no se modificaron los parámetros, debido que son los adecuadas. Elegir OK.



Open Circuit Potential			
Duration (s)	<input type="text" value="30"/>	Potential range (mV)	<input type="text" value="AUTO"/>
Measurement points	<input type="text" value="30"/>	Save results	<input type="text" value="E, t"/>
Time resolution (s)	<input type="text" value="1"/>		
Maximum potential limit (mV)	<input type="text" value="8000"/>		
Minimum potential limit (mV)	<input type="text" value="-8000"/>		
dE/dt (mV/s)	<input type="text" value="1 000E-02"/>		
Block start	<input type="text" value="Yes"/>		
Block end	<input type="text" value="Yes"/>		
Repeat block	<input type="text" value="1"/>		
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>		<input type="button" value="2"/>	<input type="button" value="Calculate"/>

Figura 6 Selected element

7.-Dar un clic en el icono *Compile the sequence to be run* para llevar a cabo el experimento. En seguida aparecerá el siguiente cuadro de diálogo.

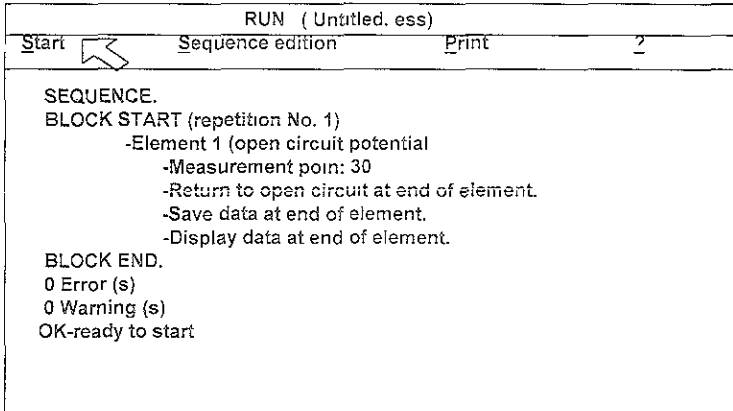
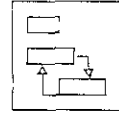


Figura 6. RUN (Untitled.ess)

En caso de haber cometido algún error en algunos de los pasos en el cuadro anterior en la parte de *Block End* aparecerá en lugar de 0 Error aparecerá el número de errores cometidos, por lo que será necesario repetir los pasos

8.- Elegir *Start*, aparecerá el cuadro de *File Save As* (fig. 7), dar nombre al archivo, elegir unidades, se recomienda guardar el archivo en a:\, para poder trabajarlos en casa A continuación aparecerá en la pantalla como se van graficando los datos que va tomando en equipo. Tomar el último valor de potencial.

9.-Dar un clic en *sequence edition* para regresar a la ventana principal. Dar un clic en el icono *Delete an element of a sequence*. Para borrar del cuadro *Sequence to be run* la determinación *Open Circuit Potential*



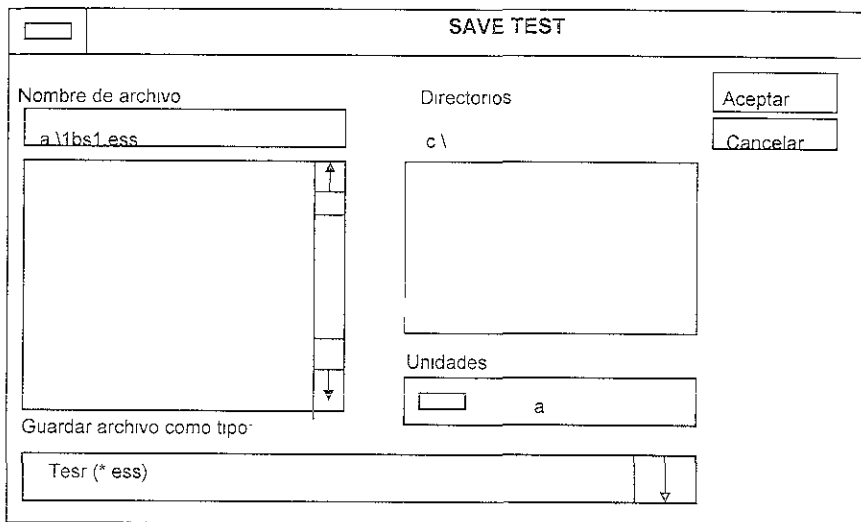


Figura 7. Save Test

Esto se hace con las probetas de cada celda, debido a que cada probeta da un potencial diferente y poder así determinar la rapidez de corrosión. Se determina el potencial de reposo semanalmente para cada probeta.

### 4.3 DETERMINACIÓN DE LAS PENDIENTES DE TAFEL

1 - Conectar electrodos y una probeta de la celda ( ver fig 3 ). Repetir los pasos del 1 al 3 descritos anteriormente en la determinación del Potencial de reposo.

2.-Dar un clic en F.A S.T. (*Free Access Signal Technique*), para marcar (fig 8)

3.-Dar un clic en el icono de la barra de herramientas llamado *Add an element to a sequence* para pasarlo al área de *Sequence to be run*.

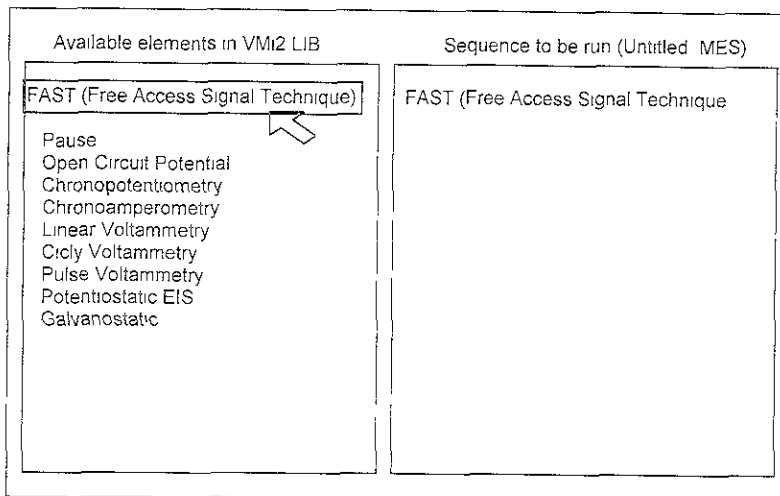
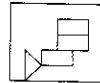


Figura 8 Área de trabajo

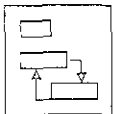
4 -Dar clic en el icono *Display the parameters of the selected element*. (fig.9)  
Teclar las condiciones de operación y dar un sobrepotencial de  $\pm 200$  mV.  
Elegir OK.



FAST (Free Access Signal Technique)			
Duration 1 (s)	<input type="text" value="15"/>	Mode	<input type="text" value="Absolute"/>
Duration 2 (s)	<input type="text" value="1"/>	Signal	<input type="text" value="Potentiostatic"/>
Duration 3 (s)	<input type="text" value="15"/>	Maximum current range	<input type="text" value="± 2 A"/>
Time resolution (s)	<input type="text" value="7 000E-02"/>	Maximum current range	<input type="text" value="± 200 nA"/>
Initial value	<input type="text" value="-400"/>	Current gain	<input type="text" value="1"/>
Intermediate value 1	<input type="text" value="-600"/>	Potential range (mV)	<input type="text" value="± 800"/>
Intermediate value 2	<input type="text" value="-600"/>	Start measurement	<input type="text" value="Yes"/>
Final value	<input type="text" value="-800"/>	Open circuit at end	<input type="text" value="Yes"/>
Measurement points	<input type="text" value="100"/>	Save results	<input type="text" value="Yes"/>
Repeat	<input type="text" value="1"/>	Display data	<input type="text" value="E, I t"/>
Block start	<input type="text" value="Yes"/>	Acquisition mode	<input type="text" value="I (E)"/>
Block end	<input type="text" value="1"/>		
Repeat block	<input type="text" value="Yes"/>		
	<input type="text" value="1"/>		
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="?"/> <input type="button" value="Calculate"/>			

Figura 9 Cuadro de selected element En este caso el potencial de reposo fue de -600 mV. es por eso que se da el intervalo de -400 a -800 mV.

5.-Dar un clic en el icono *Compile the sequence to be run* para llevar a cabo el experimento Aparecerá el cuadro de diálogo (fig. 10). En caso de haberse cometido algún error, en la figura. 10 en la parte de *Block End* en lugar de aparecer 0 Error aparecerá el número de errores cometidos, por lo que se tienen que repetir los pasos.



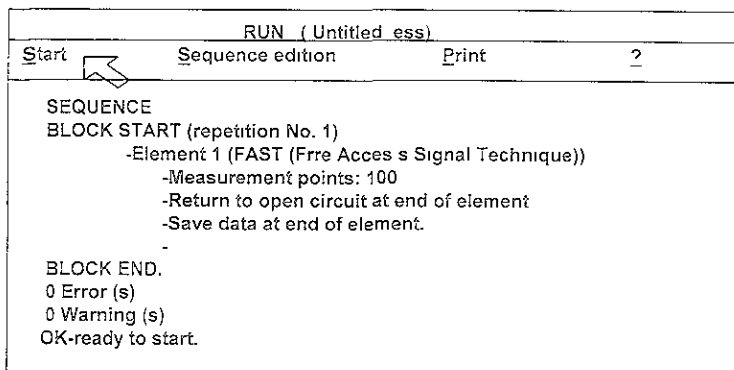
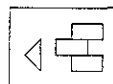


Figura 10 RUN (Untitled.ess)

6 - Elegir *Start*, aparecerá el cuadro de *File Save As* como se muestra en la figura 7, dar nombre al archivo que debe ser diferente al del potencial de reposo. A continuación aparecerá en la pantalla la gráfica obtenida.

7.-Dar un clic en *sequence edition* para regresar a la ventana principal. Dar un clic en el icono *Delete an element of a sequence* para borrar del cuadro *Sequence to be run* la determinación *Fast*.



NOTA: En caso de repetir el experimento guardarlo con otro nombre, ya que borra el anterior.

8.-Concluido el experimento, utilizando una hoja de cálculo, Microsoft Excel los datos de sobrepotencial vs logaritmo de la intensidad se grafican obteniéndose los datos de regresión de las rectas. También se pueden determinar las pendientes de Tafel desde *Radiometer Electrochemistry* utilizando el icono *Post run processing* pero no es exacto. Para abrir el archivo desde Excel tener cuidado debido que *Radiometer electrochemistry* genera 4 archivos por cada experimento, el archivo con el que se trabaja es con el archivo que termine en *aa0*, por ejemplo

Si el nombre del archivo fue *1bs1.ess* para *FAST* al querer abrirlo encontraremos los siguientes archivos.

- 1bs1.a00 Parámetros de FAST como se muestra en la figura 9.
- 1bs1.aa0 Datos de  $t$  (s),  $I$  (mA),  $E$  (mV).
- 1bs1.ess Título de la prueba
- 1bs1.lfd Rango empleado en sensibilidad

Para trabajar en Microsoft Excel se utiliza el archivo 1bs1.aa0. Lo mismo ocurre con el potencial de reposo. Se determinarán las pendientes de Tafel para cada probeta semanalmente. La nomenclatura empleada para cada probeta es la siguiente:

TABLA 1

SEMANA	CELDA 1 BLANCO		CELDA 2 PROBLEMA	
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 1	PROBETA 2
1	1bs1	2bs1	1s1	2s1
2	1bs2	2bs2	1s2	2s2
3	1bs3	2bs3	1s3	2s3
4	1bs4	2bs4	1s4	2s4
5	1bs5	2bs5	1s5	2s5
6	1bs6	2bs6	1s6	2s6
7	1bs7	2bs7	1s7	2s7
8	1bs8	2bs8	1s8	2s8
9	1bs9	2bs9	1s9	2s9

#### 4.4 DETERMINACIÓN DE ABSORBANCIA, POTENCIAL, TEMPERATURA Y pH

Se medirá la absorbancia de cada celda semanalmente utilizando el método de turbidimetría (16), la cantidad de microorganismos está directamente relacionada con la turbiedad o densidad óptica de la misma, e inversamente relacionada con la cantidad de la luz que pasa por la misma. De este modo, se puede precisar con bastante exactitud el número de microorganismos presentes en una suspensión mediante la determinación de la turbidez, para ello se empleó el espectrofotómetro de Bausch & Lomb, para corroborar el crecimiento del microorganismo, al igual que se medirá el pH, temperatura y potencial.



## 5.0 RESULTADOS

### 5.1 DETERMINACIÓN DE LA RAPIDEZ DE CORROSIÓN

Utilizando hoja de cálculo, Microsoft Excel se grafican los datos de sobrepotencial vs logaritmo de la intensidad obteniéndose los datos de regresión de las rectas:

$$\delta = b \log I + K, \text{ catódica, (pendiente catódica "b")}$$

donde

- $\delta$  = sobrepotencial
- b = pendiente catódica.
- I = intensidad de corriente
- K = ordenada al origen

$$\delta = -a \log I + K, \text{ anódica (pendiente anódica "-a")}$$

donde.

- $\delta$  = sobrepotencial.
- a = pendiente anódica.
- I = intensidad de corriente.
- K = ordenada al origen

El punto de intersección de las dos rectas (c) es el logaritmo de la intensidad de corrosión. Con el antilogaritmo obtenemos la "I" de corrosión y aplicando la ecuación:

$$R_c = 3223.43 (I_{\text{corr}} \times P.E.) / D \quad \dots \dots \dots (a)$$

$$R_c = 11575.2275 \times I_{\text{corr}} \quad \dots \dots \dots (b)$$

$$b \log I + K_b = -a \log I + K_a \quad \dots \dots \dots (c)$$

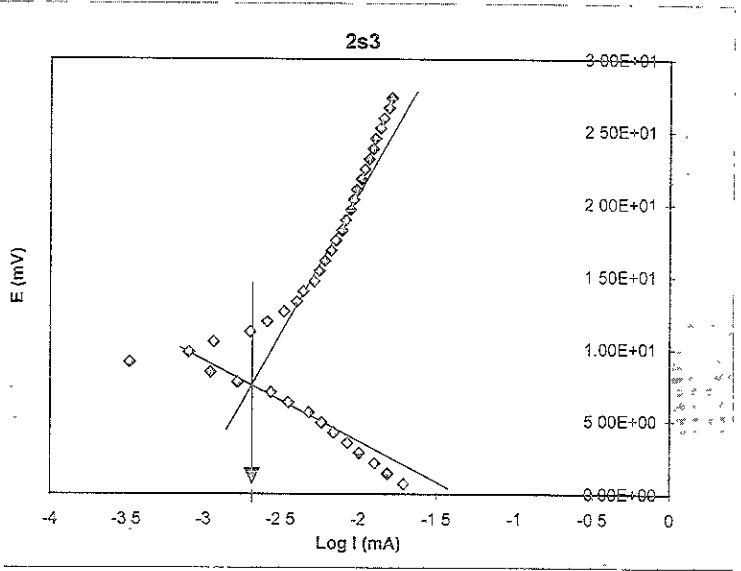
donde:

- Rc = Rapidez de corrosión en milímetros por año
- I<sub>corr</sub> = intensidad de corrosión
- P.E = Peso equivalente del metal en estudio en g<sup>eq</sup>/mol
- D = Densidad del metal en estudio en g/ml.

Se determinaron las pendientes de Tafel para cada probeta semanalmente y por consiguiente Rc. A continuación se da un ejemplo de como se determinaron las pendientes de Tafel y Rc. en el anexo se presentan 18 gráficas obtenidas de Log Intensidad I (mA) vs sobrepotencial E (mV)

Log I (mA)	E (mV)
-1.70996539	7.00E-01
-1.81247928	1.40E+00
-1.89619628	2.10E+00
-1.99567863	2.80E+00
-2.07109231	3.50E+00
-2.16052195	4.20E+00
-2.23807216	4.90E+00
-2.31966449	5.60E+00
-2.45099674	6.30E+00
-2.5654311	7.00E+00
-2.78251606	7.70E+00
-2.95860731	8.40E+00
-3.48148606	9.10E+00
-3.09691001	9.80E+00
-2.93554201	1.05E+01
-2.69897	1.12E+01
-2.58838029	1.19E+01
-2.48017201	1.26E+01
-2.39794001	1.33E+01
-2.35753548	1.40E+01
-2.28650946	1.47E+01
-2.2541448	1.54E+01
-2.21824463	1.61E+01
-2.17914201	1.68E+01
-2.14874165	1.75E+01
-2.10846254	1.82E+01
-2.08618615	1.89E+01
-2.05354773	1.96E+01
-2.03432803	2.03E+01
-2.01547269	2.10E+01
-1.98464024	2.17E+01
-1.9625735	2.24E+01
-1.93591656	2.31E+01
-1.91080163	2.38E+01
-1.89619628	2.45E+01
-1.86201327	2.52E+01
-1.84284556	2.59E+01
-1.80910828	2.66E+01
-1.79236563	2.73E+01

CALCULO DE LA RAPIDEZ DE CORROSIÓN (Rc)  
 CELDA 2 - PROBETA 2 DE LA SEMANA 3



Ecuación de la rama anódica

$$y = -5.1705x - 7.2079 \quad R^2 = 0.9145$$

Ecuación de la rama catódica

$$y = 22.74x + 67.102 \quad R^2 = 0.9745$$

Igualando ecuaciones y despejando x

$$x = \log -2.66$$

Ant Log (-2.66) = 0.0021755

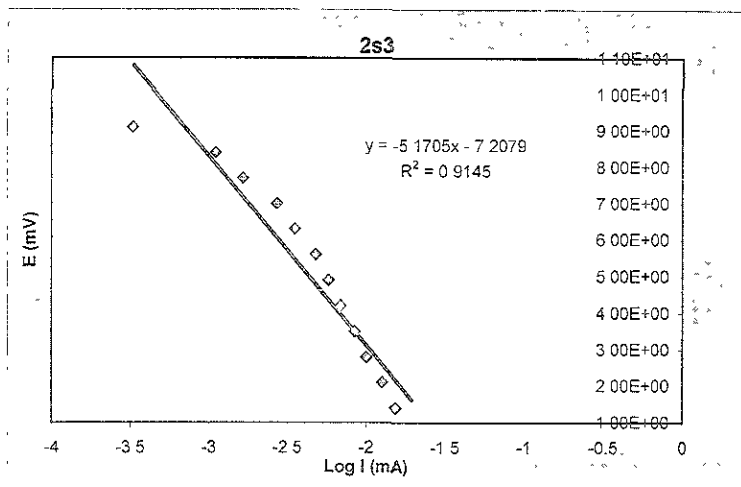
Intensidad de corrosión (I<sub>corr</sub>) = 0.0021755

R<sub>c</sub> (mm/año) = 11575.2275 \* I<sub>corr</sub>

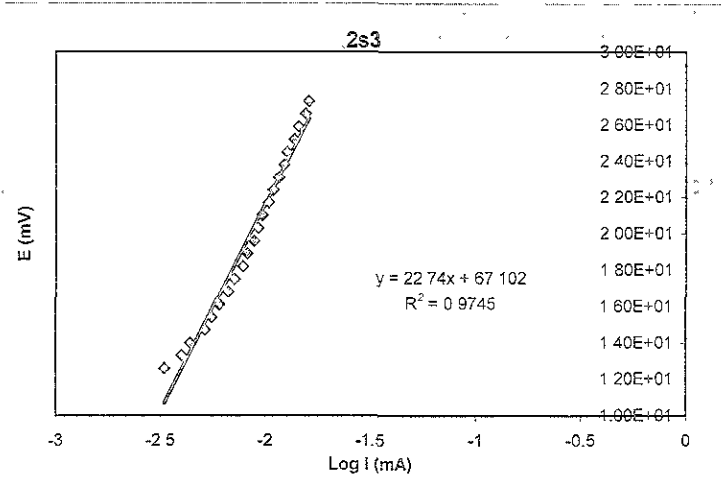
R<sub>c</sub> = 25.183 mm/año

CALCULO DE LAS PENDIENTES DE TAFEL  
 CELDA 2 - PROBETA 2 DE LA SEMANA 3

Log I (mA)	E (mV)
-1.70996539	7.00E-01
-1.81247928	1.40E+00
-1.89619628	2.10E+00
-1.99567863	2.80E+00
-2.07109231	3.50E+00
-2.16052195	4.20E+00
-2.23807216	4.90E+00
-2.31966449	5.60E+00
-2.45099674	6.30E+00
-2.5654311	7.00E+00
-2.78251606	7.70E+00
-2.95860731	8.40E+00
-3.48148606	9.10E+00



Log I (mA)	E (mV)
-2.48017201	1.26E+01
-2.39794001	1.33E+01
-2.35753548	1.40E+01
-2.28650946	1.47E+01
-2.2541448	1.54E+01
-2.21824463	1.61E+01
-2.17914201	1.68E+01
-2.14874165	1.75E+01
-2.10846254	1.82E+01
-2.08618615	1.89E+01
-2.05354773	1.96E+01
-2.03432803	2.03E+01
-2.01547269	2.10E+01
-1.98464024	2.17E+01
-1.9625735	2.24E+01
-1.93591656	2.31E+01
-1.91080163	2.38E+01
-1.89619628	2.45E+01
-1.86201327	2.52E+01
-1.84284556	2.59E+01
-1.80910828	2.66E+01
-1.79236563	2.73E+01



En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos de rapidez de corrosión calculada para cada celda y en las tablas 3 y 4 los valores de temperatura, pH, absorbancia, y potencial. Cabe mencionar que a partir de la segunda medición, se hizo después de un periodo de 9 meses y posteriormente se hicieron semanalmente.

TABLA 2

VALORES DE RAPIDEZ DE CORROSIÓN (Rc), mm/año				
	CELDA 1 (BLANCO)		CELDA 2 (PROBLEMA)	
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 1	PROBETA 2
1	5 984	4.144	5.000	5 950
2	25 928	-	11.922	3.787
3	15 858	-	12.930	25.183
4	19 852	-	4.507	16 252
5	25 234	2.03	14 758	25 512
6	17 664	4 105	5.788	12 154
7	35.304	4.275	4.797	6.214
8	19.720	4.933	11.638	16.923
9	18.305	7.602	5.79	7.250

Tabla 3

CELDA 1 (BLANCO)				
LECTURA	T °C	pH	ABS	E (mv)
1	22	6.0	0.05	40
2	21	8.1	0.75	20
3	20	8.1	0.85	20
4	20	7.8	1.0	85
5	24	7.7	0.75	60
6	22	8.4	0.69	150
7	24	7.6	0.75	210
8	22	7.4	0.75	250
9	24	7.45	0.80	100

Donde T °C = temperatura, pH = pH de la celda, ABS = absorbancia de la celda, E (mV) = potencial.

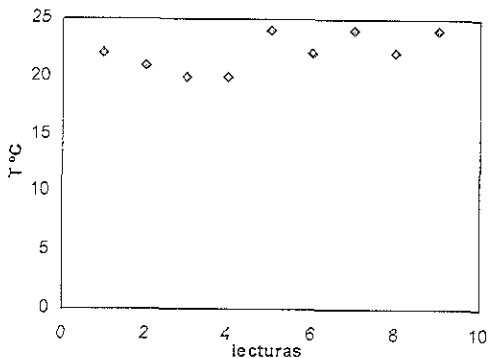
Tabla 4

CELDA 2 (PROBLEMA)				
LECTURA	T °C	pH	ABS	E (mV)
1	22	4.2	0.49	1100
2	21	8.3	0.31	70
3	20	8.6	0.33	67
4	20	7.7	0.51	30
5	24	7.9	0.43	20
6	22	7.9	0.37	10
7	24	7.7	0.39	10
8	22	7.8	0.40	40
9	24	7.9	0.37	40

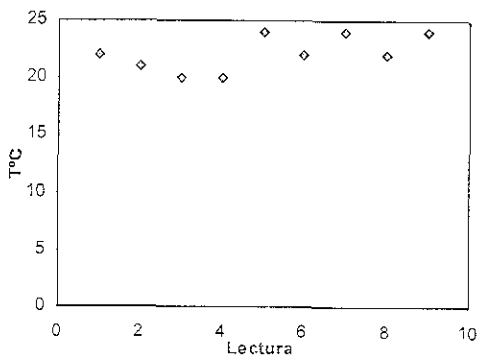
Donde T °C = temperatura, pH = pH de la celda, ABS = absorbancia de la celda, E (mV) = potencial

## 6.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las siguientes gráficas muestran los resultados de las tablas 3 y 4. Las gráficas 1 y 2, podemos observar que la temperatura se mantuvo constante, el efecto de la temperatura sobre la rapidez de corrosión es difícil de predecir, según algunos informes<sup>2,3</sup> nos indican que la rapidez de corrosión se ve afectada aproximadamente por cada 10 °C que aumente la temperatura por lo que en este caso es un factor que no afecta a la Rapidez de Corrosión.



Gráfica 1 Variación de la Temperatura de la Celda 1

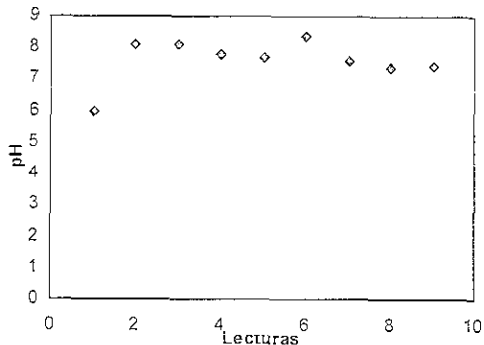


Gráfica 2 Variación de la Temperatura de la Celda 2

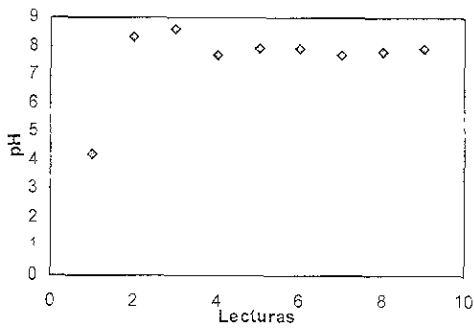
2 C. Skaperdas y H. Uhlig, *Ind Eng Chem*, 34, 748 (1942)

3 K. Butlin, W. Vernon y L. Whiskin, *Symposium on Corrosion of Buried Metals* pág 29, Iron and Steel Inst Londres

En la gráfica 3 el pH al inicio el pH es de 6.0 y después de 9 meses el pH aumenta a 8.1 y varía hasta 7.4, esto nos da indicio que hay formación de sales ferrosas. Con respecto a la gráfica 4 al inicio el pH es bajo, esto es debido a la formación de ácido láctico que producen los lactobacilos, después de 9 meses que corresponde a la segunda medida el pH aumenta de 4.2 a 8.3, esto nos indica que ya no hay formación de ácido láctico por lo tanto ya no hay lactobacilos.



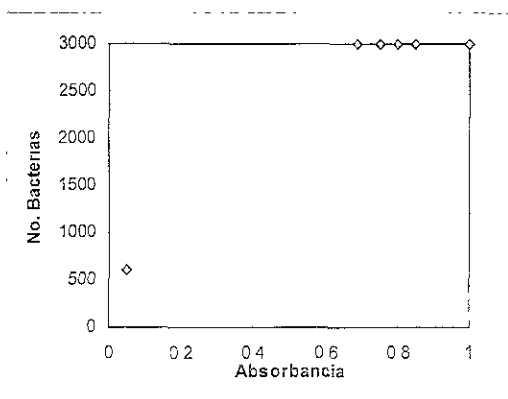
Gráfica 3 Variación del pH de la Celda 1



Gráfica 4 Variación del pH de la Celda 2

En la gráfica 5 la absorbancia aumenta debido a la formación de sales ferrosas y con el transcurso del tiempo se mantiene constante. En la gráfica 6 la absorbancia va aumentando debido al crecimiento de los lactobacilos y con el transcurso del tiempo se mantiene constante, esto se debe a que ya no hay formación de ácido láctico, por lo que ya no hay lactobacilos. El No. aproximado de bacterias se tomó de la escala de McFarland correspondiente a la absorbancia, como podemos ver hay más bacterias en la celda 1 que en la celda 2, por lo tanto hay más corrosión en la celda 1, esto indica que se contaminó la celda como ya se mencionó anteriormente, la segunda medición se hizo después de 9 meses.

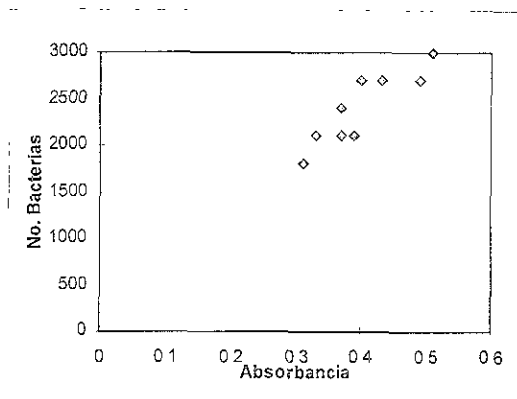
Absorbancia Celda 1	No. aproximado bacterias $\times 10^6/\text{ml}$
0.05	6,00
0.75	3,000
0.85	3,000
1.0	3,000
0.75	3,000
0.69	3,000
0.75	3,000
0.75	3,000
0.80	3,000



Gráfica 5 Variación de la absorbancia de la Celda 1

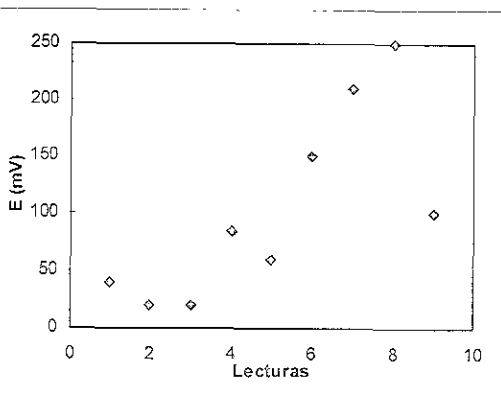


Absorbancia Celda 2	No. aproximado bacterias $\times 10^6/\text{ml}$
0.49	2,700
0.31	1.800
0.33	2,100
0.51	3,000
0.43	2,700
0.37	2,100
0.39	2,100
0.40	2,700
0.37	2,400

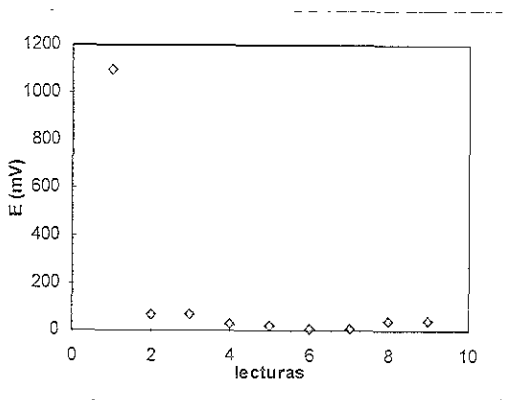


Gráfica 6 Variación de la absorbancia de la Celda 2

Con respecto a las gráficas 7 y 8 los potencial de las celdas en ambas gráficas aumenta, aunque en la gráfica 8 no aumenta considerablemente por lo que hay mayor corrosión en la celda 1



Gráfica 7. Variación del potencial de la Celda 1



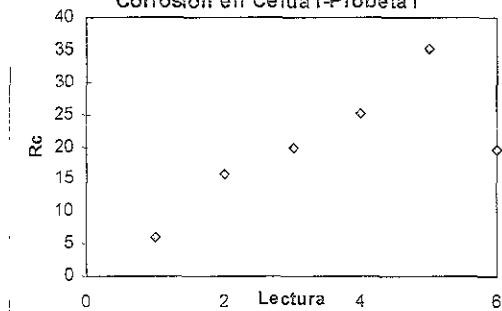
Gráfica 8 Variación del potencial de la Celda 2

En la tabla 2.1 se muestran valores de Rapidez de corrosión de la probeta 1 en las dos celdas, con sus respectivas gráficas.

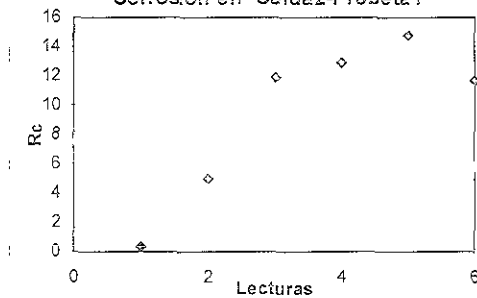
Tabla 2.1

Valores de Rapidez de Corrosión (Rc) en mm/año		
	Celda1-Probeta1	Celda2-Probeta2
1	5.984	0.346
2	15.858	5.000
3	19.852	11.922
4	25.234	12.930
5	35.304	14.758
6	19.72	11.638

Gráfica 9. Variación de la Rapidez de Corrosión en Celda1-Probeta1



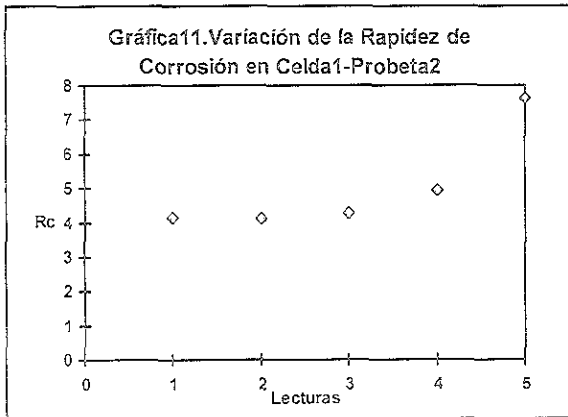
Gráfica 10. Variación de la Rapidez de Corrosión en Celda2-Probeta1

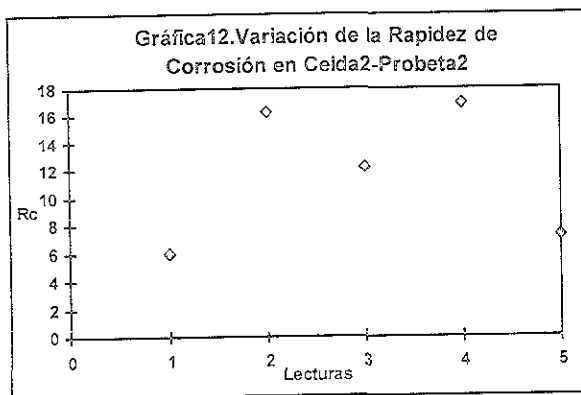


Las gráficas 9 y 10 nos muestran que la Rapidez de corrosión aumenta con el transcurso del tiempo, aunque en la última lectura disminuye debido a los efectos de pasivación. Era de esperarse que hubiera más corrosión en la celda 2 pero no fue así, se tuvo lo contrario por la contaminación de las celdas. Se seleccionaron estos valores para poder observar con mayor claridad el aumento de Rc.

Tabla 2 2

Valores de Rapidez de Corrosión (Rc) en mm/año		
	Celda1-Probeta1	Celda2-Probeta2
1	4.144	5.950
2	4.105	16.252
3	4.275	12.154
4	4.933	16.923
5	7.602	7.25





En la gráfica 11, se puede observar que  $R_c$  aumenta muy lentamente en las semanas 2 a la 4 no se tuvieron mediciones, ya que en las gráficas obtenidas no era posible determinar la  $R_c$ . En la gráfica 12 podemos observar que  $R_c$  aumenta y disminuye. Comparando las gráficas 9 y 10 con las gráficas 11 y 12 se contradicen, esto se debe a los problemas con la probeta 2 de que no se obtenían las  $R_c$ .

En los valores de  $R_c$  de las probetas 1 y 2 de la celda1 hay más variación con respecto a las probetas de la celda 2, esto es debido porque se hizo una limpieza en el electrodo de referencia, aunque se hizo con mucho cuidado, hubo alteración en el sistema.

Con respecto a las gráficas de Log Intensidad  $I$  (mA) vs sobrepotencial  $E$  (mV) del anexo podemos observar que las primeras gráficas salieron muy ruidosas y conforme pasa el tiempo estas van mejorando.

## 7.0 CONCLUSIONES

La Rapidez de Corrosión tiende a aumentar conforme pasa el tiempo, no aumenta linealmente, esto es debido a los efectos de pasivación por lo que a veces aumenta y otras veces disminuye.

La adaptación de las celdas de trabajo al equipo VoltaLab 32 Electrochemical Laboratory es satisfactoria, ya que da resultados confiables<sup>3</sup> y sin tener la necesidad de utilizar los electrodos del equipo

Con respecto a las celdas de trabajo su diseño permite el fácil transporte al laboratorio y se pueden hacer las mediciones de temperatura, pH, absorbancia y potencial sin contaminarlas.

El equipo VoltaLab™32 Electrochemical Laboratory constituye una herramienta muy valiosa, proporcionando datos exactos y confiables, en tiempos relativamente cortos. La utilización de electrodos diferentes a los del equipo genera las gráficas un poco ruidosas pero se mejoran al modificar el tiempo de resolución, en nuestro caso se varió de 0.5 a 0.7 s. Con los electrodos del equipo las gráficas no salen ruidosas

El software del equipo da acceso a trabajar los datos en Microsoft Excel, por lo que permite hacer los cálculos con más exactitud

<sup>3</sup> Ver referencia de la bibliografía No. 5

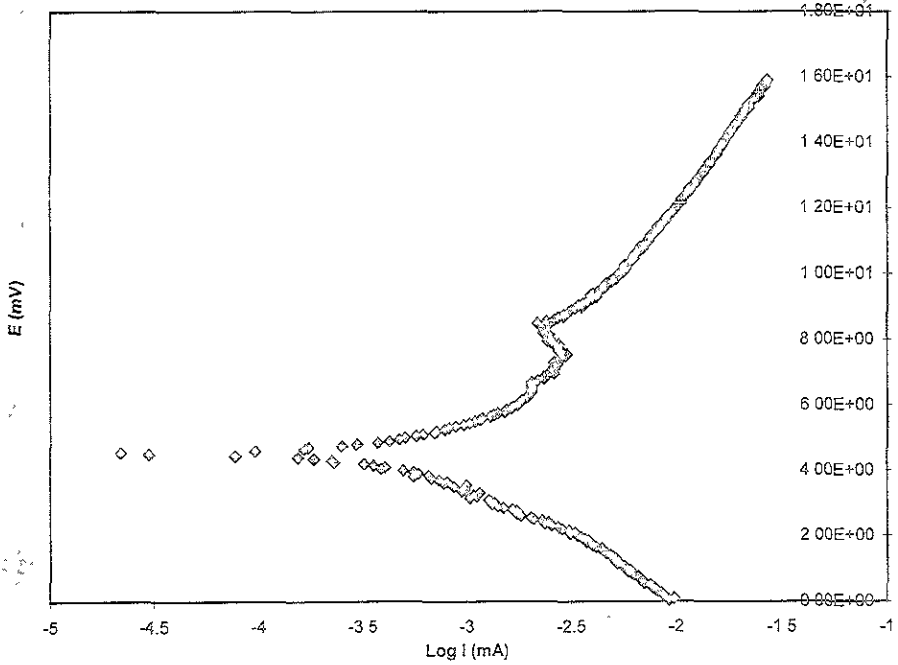
## 8.0 BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Herbert H Uhlig Corrosión y Control de Corrosión, Editorial Urmo, España 1979
- 2.- Kirk E. Raymond, Donald F. Othmer Enciclopedia de la Tecnología Química, Editorial Hispanoamericana, Vol 5, México 1962
- 3.- Perry H Robert, Cecil H. Hilton Manual del Ingeniero Químico. 5ª edición, Editorial McGraw-Hill, México 1986
- 4.- Jean Chantereau, Anne-Marie Bouffard, Corrosión Bacteriana, 1ª edición, Editorial Limusa. México 1985.
- 5.- Pérez Saavedra J de Jesús, Estudio de la Corrosión por Métodos Electroquímicos de acero estructural 1010 causada por una mezcla de microorganismos anaerobios Tesis de Maestría. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan UNAM , México 1998.
- 6.- West John M. Corrosión y Oxidación, 1ª edición, Editorial Limusa, México 1986.
- 7.- Bastida Ferra Rolando, Apuntes de propiedades de los materiales II, 1ª edición, IPN, México 1995.
- 8.- Chen, G., Palmer. R.J. Instrumental Analysis of Microbiologically Influenced Corrosión, Biodegradation, V 8, n 3, Jun 1997, p 189-200
- 9.- Simard, S Menard, H Electro-oxidation of 1024 mild steel in slightly alkaline phosphate and bicarbonato solutions Journal of Applied Electrochemistry V 28 n 6 Jun 1998, p 593-600.
- 10.- Ilyushchenko M.A., Danilenko A V Corrosión potentiometric sensors: Properties, theory and origin mechanism of pseudo-Nernstian electrode response Sensors and Actuators: B. Chemical VB 44 n 1-3pt 5 oct 1997, p 542-550.
- 11.- Zhao Yanyun, Kolbe Edward, Flugstad. Method to characterize electrode corrosion during ohmic heating. Journal of Food Process Engineering V 22 n1 1999, p 81-89
- 12.-Rose H. A. Microbiología Química Introducción a la Fisiología Microbiana. Editorial Alhambra, España 1977.

- 13 - Lenon, G. Louvel, L. Lebeault *Improvement of microbiological control in closed water systems for the paper and board industry* Cent Thnique du Papier, Grenoble Francia 1998.
- 14 - Paredón Delgado Juan, *Aplicaciones de los Métodos Electroquímicos a los estudios de Corrosión*. Tecnolab. Octubre 1986. P 23-37
- 15 -Manual del Equipo VoltaLab 32 Electrochemistry. Radiometer/copenhagen
- 16.-Ramírez Gama R. M., *Manual de Prácticas de Microbiología General*. Laboratorio de Microbiología Experimental Facultad de Química, UNAM, 1992
- 17.- Fraizer W. C., Westhoff D.C., *Microbiología de los alimentos*, 3ª edición, Editorial Acribia, Zaragoza España 1985.
- 18.- Demeter J Karl, Elberthagen H., *Elementos de Microbiología Lactológica*, 6ª edición, Editorial Acribia, España 1971.
- 19.- Flinn A. Ricar, Paul K Trojan, *Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones*, 3ª edición, Editorial McGraw-Hill, Colombia 1989.
- 20.- Avner H. Sydney, *Introducción a la Metalurgia Física*, 2ª edición, Editorial McGraw-Hill, México 1988



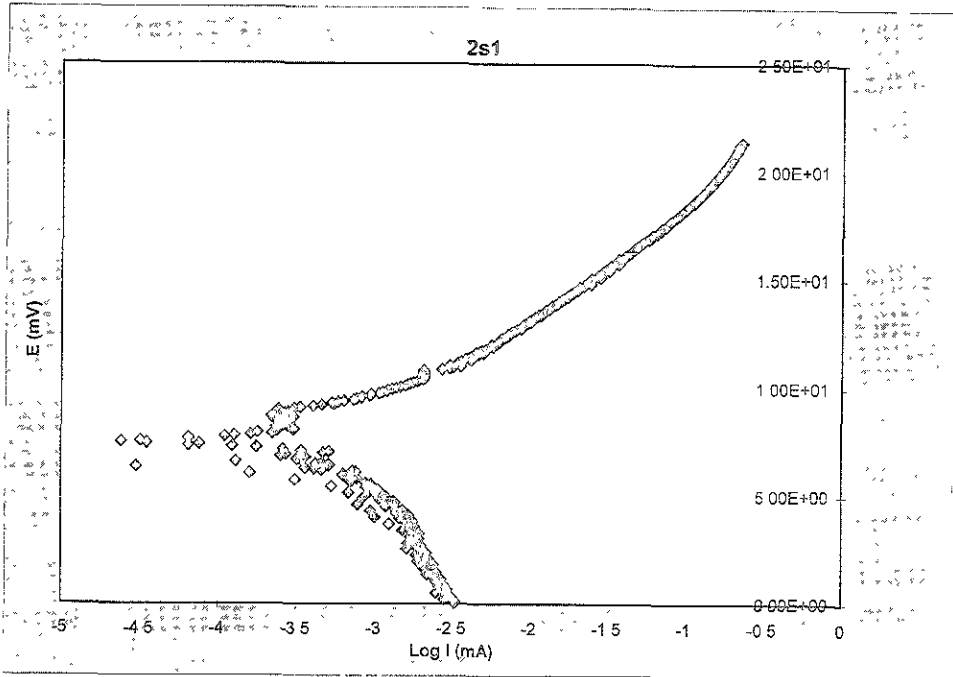
2bs1



$$y = -3.1318x - 5.9881$$
$$y = 2.3182x + 12.793$$

$$R^2 = 0.9783$$
$$R^2 = 0.8109$$

$x = -3.446$   
Ant Log = 3.5804E-04  
Rc = 4.144 mm/año



$$y = -11.169x - 27.754$$

$$R^2 = 0.8881$$

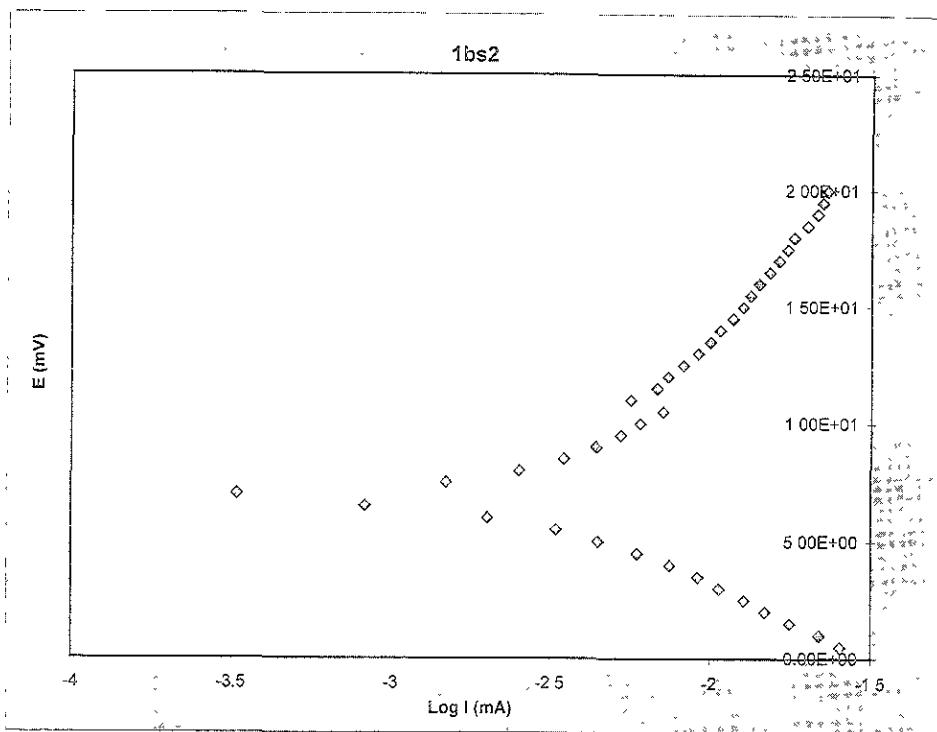
$$y = 3.5632x + 20.7$$

$$R^2 = 0.9605$$

$$x = -3.29$$

$$\text{Ant Log} = 5.14E-04$$

$$R_c = 5.95 \text{ mm/año}$$



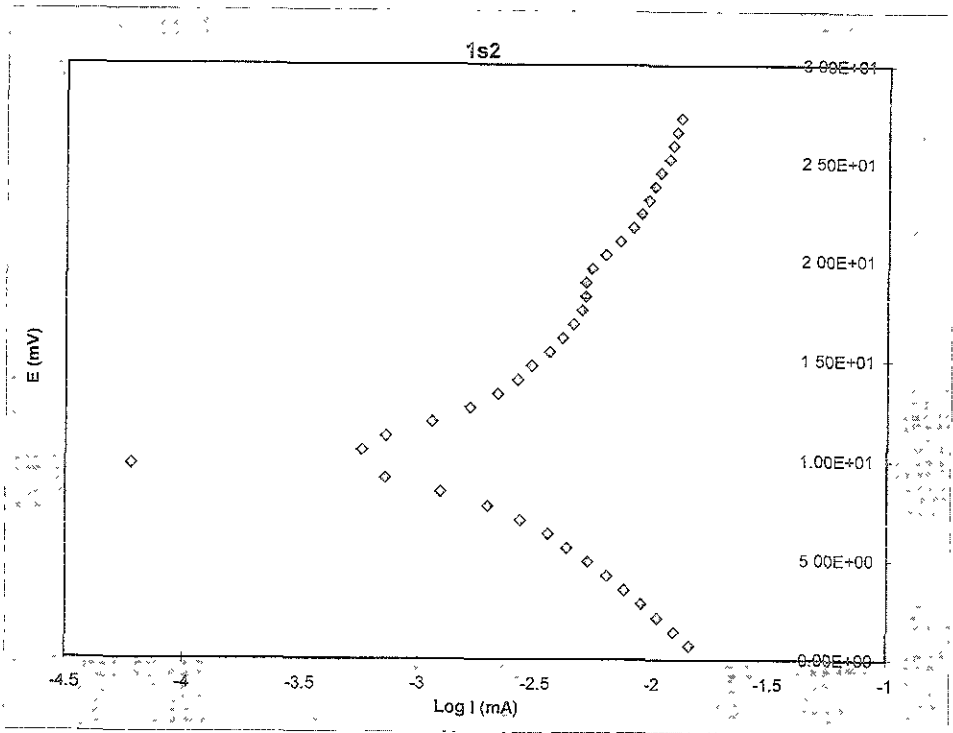
$$y = -5.0747x - 7.1173$$

$$y = 12.022x + 38.18$$

$$R^2 = 0.969$$

$$R^2 = 0.9222$$

$x = -2.65$   
 Anti Log = 0.00224  
 $R_c = 25.928 \text{ mm/año}$



$$y = -6.7265x - 10.899$$

$$R^2 = 0.9546$$

$$y = 13.66x + 50.027$$

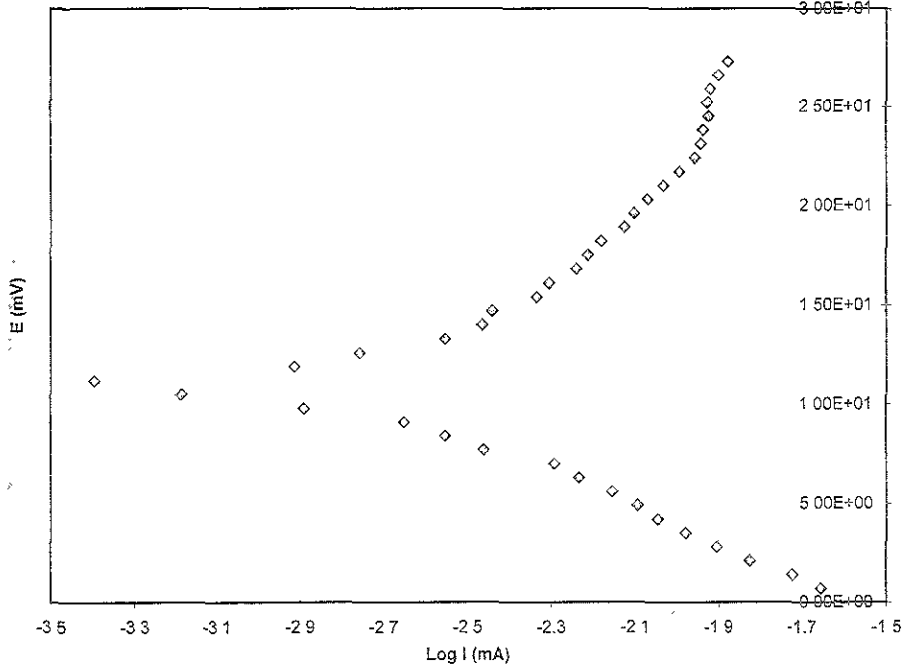
$$R^2 = 0.9385$$

$$x = -2.988$$

$$\text{Ant Log} = 0.00103$$

$$R_c = 11.922 \text{ mm/año}$$

1bs3



$$y = -6.9609x - 10.012$$

$$R^2 = 0.9429$$

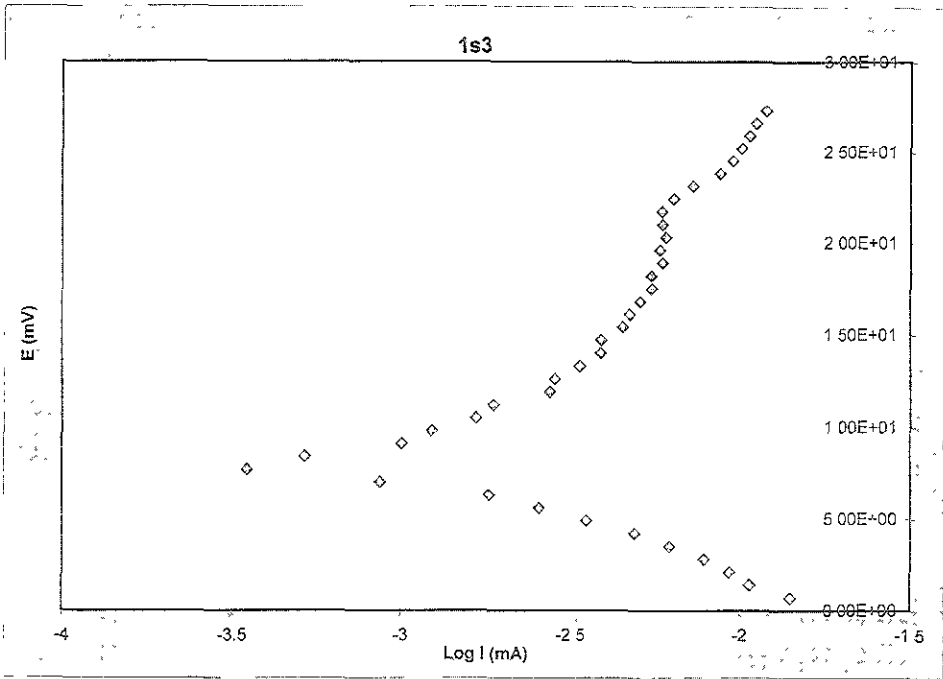
$$y = 13.153x + 47.605$$

$$R^2 = 0.9005$$

$$x = -2.8645$$

$$\text{Ant Log} = 0.00137$$

$$R_c = 15.858 \text{ mm/año}$$



$$y = -4.5048x - 6.7721$$

$$R^2 = 0.9201$$

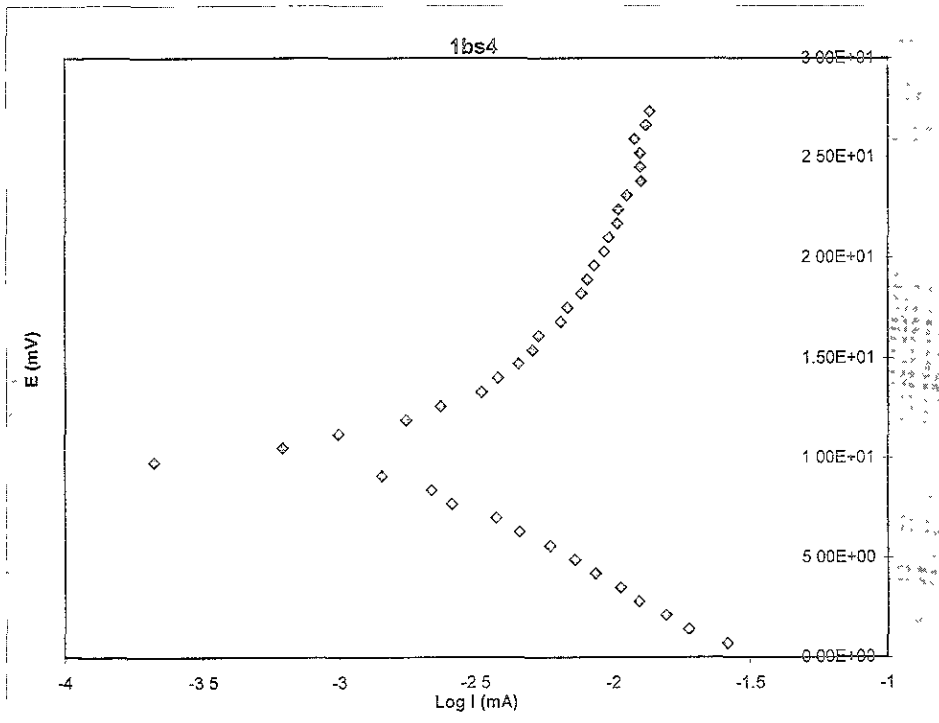
$$y = 18.608x + 61.454$$

$$R^2 = 0.9057$$

$$x = -2.952$$

$$\text{Ant Log} = 0.001117$$

$$R_c = 12.930 \text{ mm/año}$$



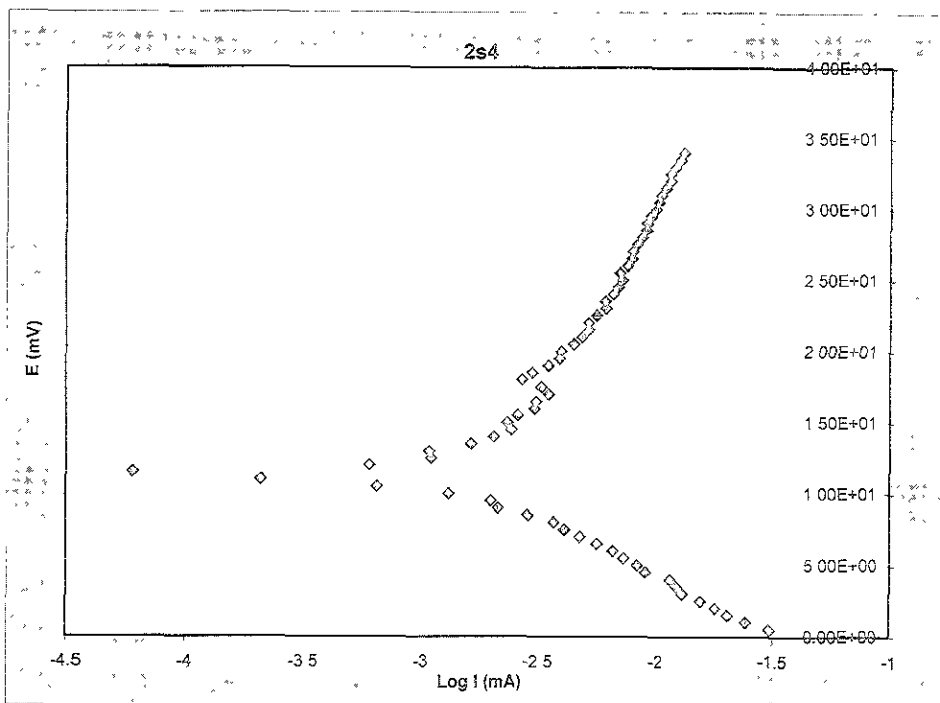
$$y = -7.4783x - 11.324$$

$$y = 15.321x + 51.733$$

$$R^2 = 0.9928$$

$$R^2 = 0.9127$$

x = -2.766  
 Ant Log = 0.001715  
 Rc = 19.852 mm/año



$$y = -6.9206x - 9.6373$$

$$R^2 = 0.9606$$

$$y = 22.709x + 74.883$$

$$R^2 = 0.9504$$

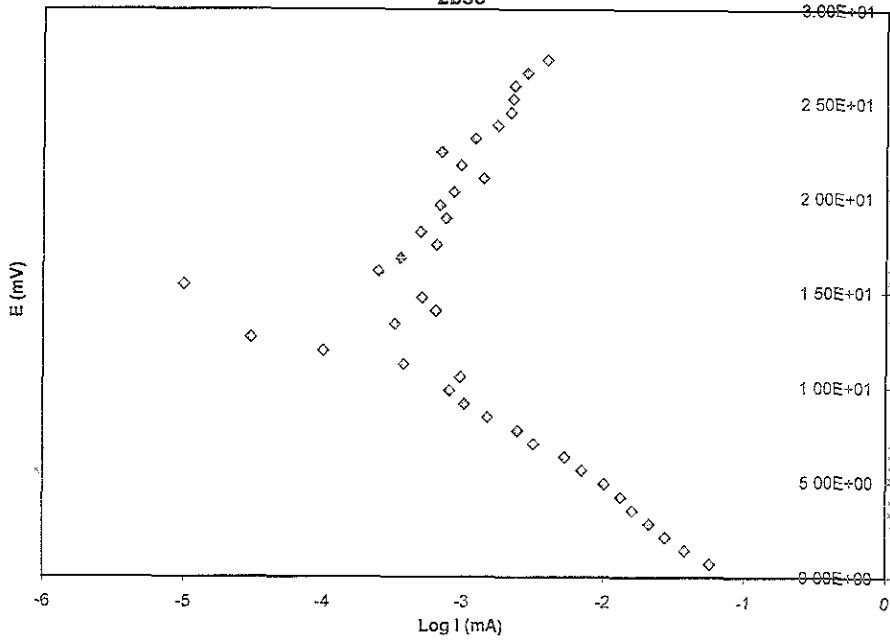
$$x = -2.853$$

$$\text{Ant Log} = 0.001404$$

$$R_c = 16.252 \text{ mm/año}$$



2bs5

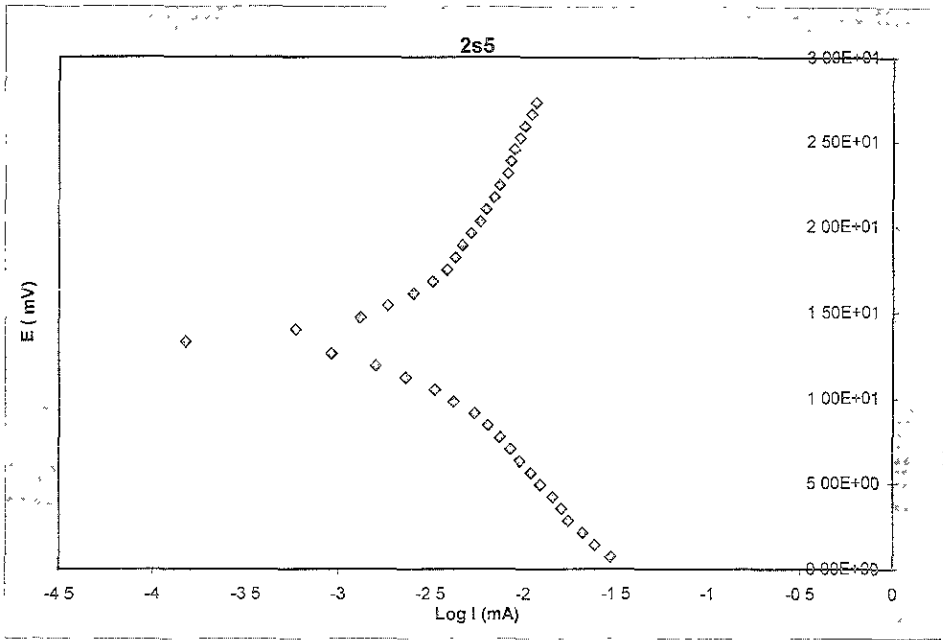


$$y = -4.9867x - 5.3988$$
$$y = 10.571x + 53.037$$

$$R^2 = 0.9892$$
$$R^2 = 0.9584$$

$x = -3.75$   
Ant Log =  $1.754 \cdot 10^{-4}$   
 $R_c = 2.03 \text{ mm/año}$

2003  
12  
12



$$y = -10.393x - 15.014$$

$$R^2 = 0.9792$$

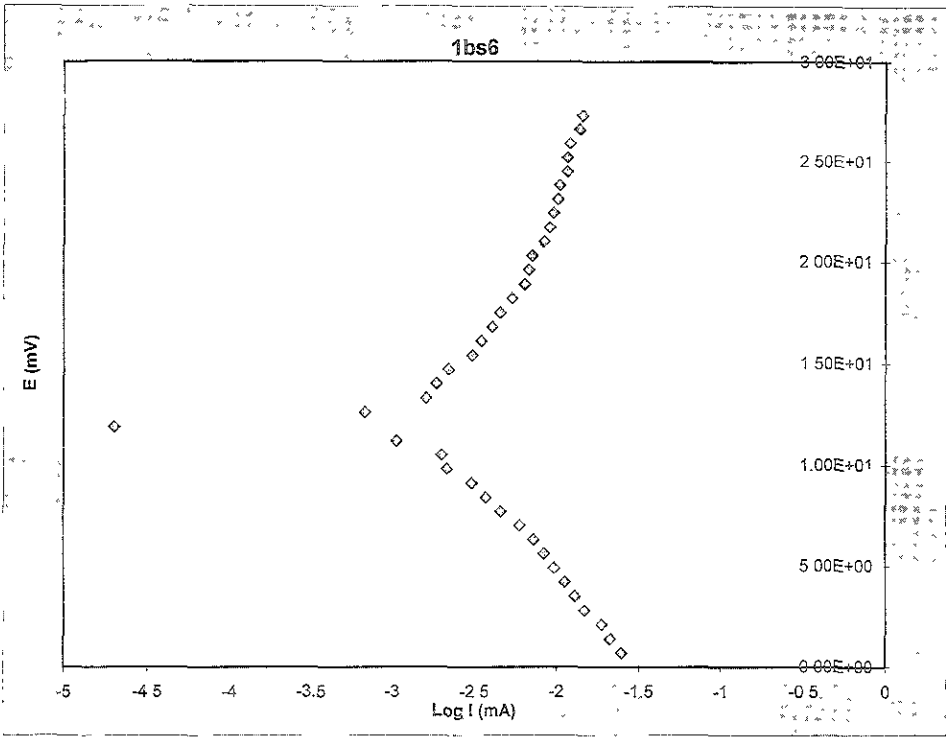
$$y = 19.432x + 64.222$$

$$R^2 = 0.9818$$

$$x = -2.65$$

$$\text{Ant Log} = 0.002204$$

$$R_c = 25.512 \text{ mm/año}$$



$$y = -8.8078x - 13.055$$

$$R^2 = 0.9888$$

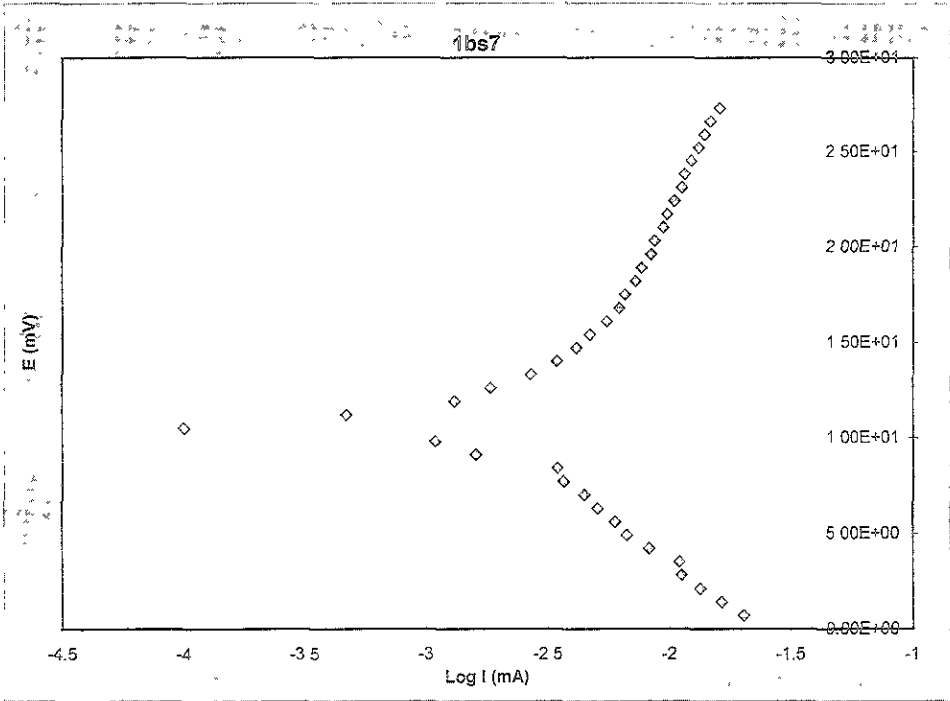
$$y = 13.603x + 50.061$$

$$R^2 = 0.9396$$

$$x = -2.816$$

$$\text{Ant Log} = 0.001526$$

$$R_c = 17.664 \text{ mm/año}$$



$$y = -7.7531x - 11.941$$

$$R^2 = 0.9478$$

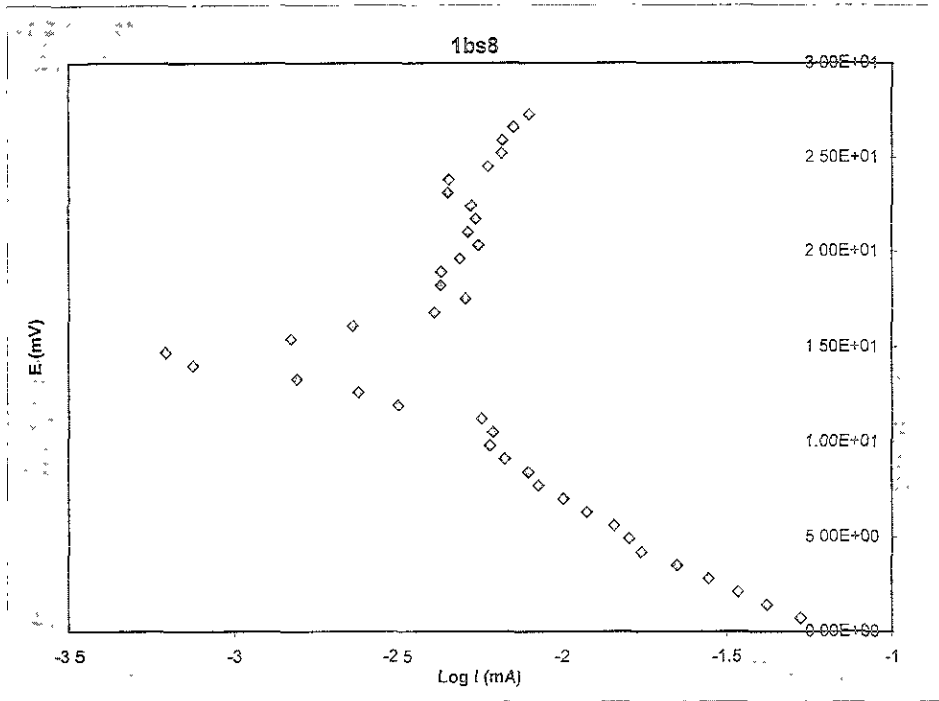
$$y = 21.426x + 64.97$$

$$R^2 = 0.9665$$

$$x = -2.516$$

$$\text{Ant Log} = 0.00305$$

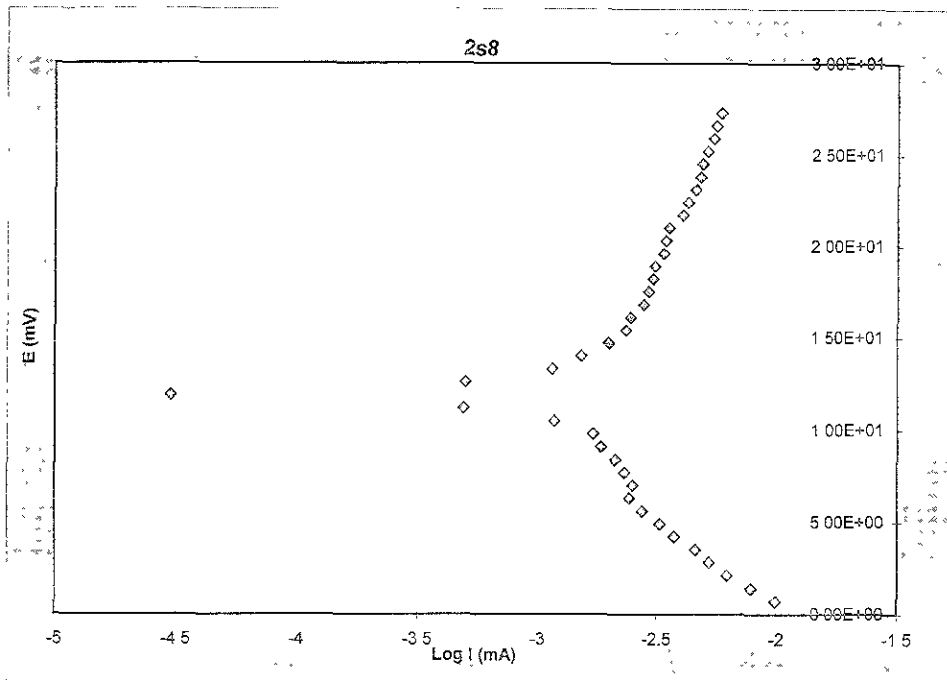
$$R_c = 35.304 \text{ mm/año}$$



$y = -9.317x - 11.423$   
 $y = 17.202x + 61.998$

$R^2 = 0.9693$   
 $R^2 = 0.8204$

$x = -2.7686$   
 Ant Log = 0.0017  
 $R_c = 19.7202 \text{ mm/año}$



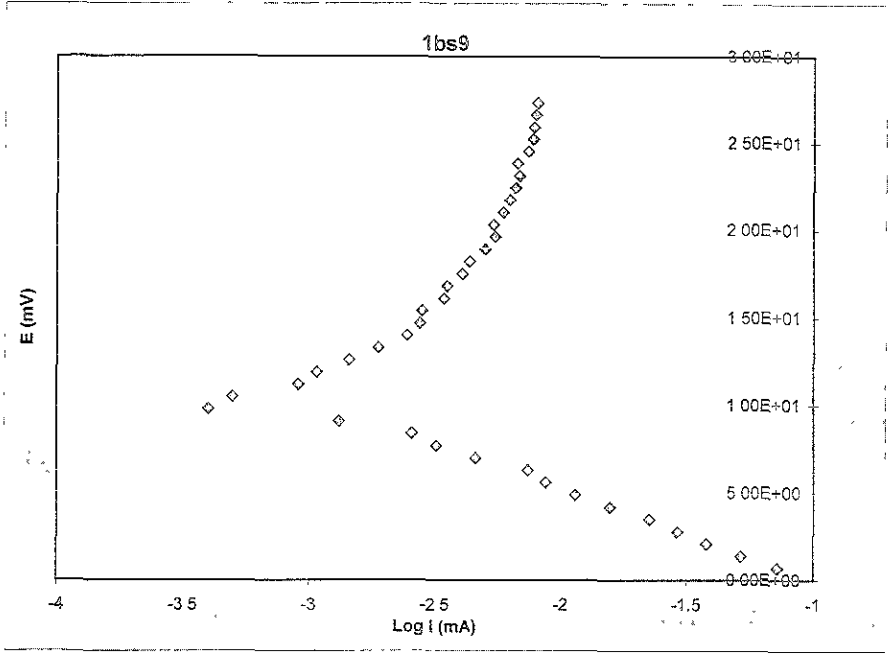
$$y = -12.372x - 25.318$$

$$y = 27.953x + 89.005$$

$$R^2 = 0.9645$$

$$R^2 = 0.9833$$

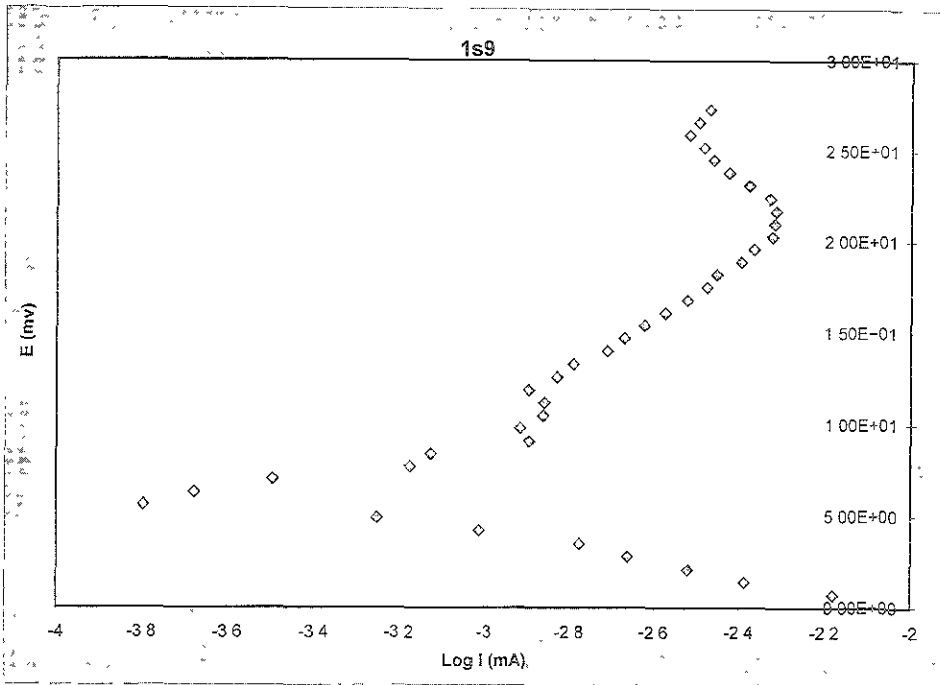
$x = -2.835$   
 Ant Log = 0.00146  
 Rc = 16.923 mm/año



$$y = -5.0777x - 4.9692 \quad R^2 = 0.9929$$

$$y = 21.494x + 69.457 \quad R^2 = 0.9563$$

x = -2.80  
 Ant Log = 0.00158  
 Rc = 18.305 mm/año



$$y = -3.1914x - 5.861 \quad R^2 = 0.9351$$

$$y = 15.822x + 56.899 \quad R^2 = 0.9691$$

$x = -3.30$   
 Ant Log =  $5.002 \times 10^{-4}$   
 $R_c = 5.79 \text{ mm/año}$