

41  
rej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN EN ACERO  
ESTRUCTURAL A.I.S.I. 1010 INDUCIDA POR  
BACTERIAS AEROBIAS Y ANAEROBIAS.**

**TESIS MANCOMUNADA**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**  
P R E S E N T A N:

**LUIS DIEGO PACHECO**  
**LIZBETH HERNÁNDEZ GONZÁLEZ**  
**ELVIA ARLETTE PRIEGO BLANCAS**



MÉXICO, D.F.

1995

FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

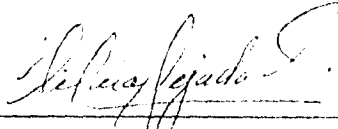
**JURADO ASIGNADO SEGÚN EL TEMA:**

PRESIDENTE: Prof. LILIA VIERNA GARCÍA.  
VOCAL: Prof. SILVIA LILIA TEJADA CASTAÑEDA.  
SECRETARIO: Prof. JOAN GENESCÁ LLONGUERAS.  
1er. SUPLENTE: Prof. AURORA DE LOS ÁNGELES RAMOS MEJÍA.  
2do. SUPLENTE: Prof. FRANCISCO JAVIER RODRÍGUEZ GÓMEZ.

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Laboratorio 112.  
Departamento de Físicoquímica.  
División de Estudios de Posgrado.  
Facultad de Química, U.N.A.M.

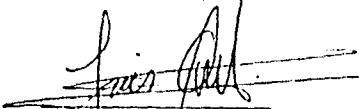
**ASESOR DEL TEMA:**


  
Q.F.B. Silvia Lilia Tejada Castañeda.

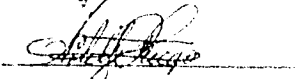
**SUPERVISOR TÉCNICO:**

  
Q. Ana Isabel Carranco Pérez.

**SUSTENTANTES:**

  
Luis Diego Pacheco.

  
Lizbeth Hernandez González.

  
Elvia Affette Priego Blancas.

*A las personas que más amo  
A mis padres  
Elvia y Raymundo*

*A mis hermanos  
Ray, Lorena y Ulises*

*A la memoria de  
Dulce*

*A todos mis maestros*

*Arlette*

## **Dedico el siguiente trabajo ...**

### **A MIS PADRES.**

*Prisciliano Diego Méndez y  
Felicina Pacheco Ticó.*

Quienes con su ejemplo de superación, honradez y dedicación al trabajo han hecho de mí todo lo que soy y que seré; y con quienes puedo decir ¡lo logramos!.

### **A mi flaquita.**

*Liz Hernández Gil.*

Quien ha estado a mi lado de forma incondicional para compartir alegrías y desventuras en todo este tiempo y a quien debo en gran medida el haber alcanzado esta meta.

### **A mis hermanos y sus familias.**

*Pablo, Isabel y Olivia .*

De quienes siempre recibí, de una u otra forma, el aliento necesario para alcanzar este objetivo.

### **A mis amigos.**

*Rubén O., Beto "El Matado",  
Cristóbal y Enrique.*

De quienes siempre estaré agradecido por su apoyo y amistad.

### **A Arlette Priego .**

Por el equipo de trabajo que formamos durante la realización de esta tesis.

A todos los compañeros y maestros de la *Facultad de Química* que de alguna forma estuvieron involucrados en mi formación.

### **A mi Alma Mater.**

La *Universidad Nacional Autónoma de México*, a la que debo más que mi preparación, mi formación como profesional.

*Luis Diego Pacheco.*

## **AGRADECIMIENTO A MIS PADRES**

Gracias papá y mamá por el gran apoyo que me han brindado durante estos años de preparación, porque si por algo estoy aquí es por ustedes, por sus innumerables consejos y por la fortaleza que me han dado cada día.

En verdad mami y papi, es a ustedes a quien debo todos mis logros. Con el apoyo que me brindan voy con el corazón lleno de ganas de irme habriendo nuevos caminos, a ustedes les doy mi agradecimiento por su esfuerzo al querer que yo sea alguien en la vida y no sólo les doy mi agradecimiento sino también mi promesa de que sabré tomar en cuenta todo lo que hicieron por mi y se los voy a demostrar superándome día con día. Siento que en verdad han sabido concluir su labor de padre y madre, brindándome sus consejos, su apoyo y sobre todo algo que es lo más importante para mí : **SU AMOR.**

## **DEDICATORIAS**

Dedico este trabajo a :

- *Dios* por haberme dado salud y aliento para lograr mis objetivos y por haberme permitido alcanzar una meta más.
- Mis padres *Teodoro Hdz y Carolina Glz* por su amor y apoyo.
- Tí *CCC* , mi pareja en las buenas y en las malas *Luis Diego*, porque eres parte fundamental de este logro, por todos los incomparables momentos que hemos compartido juntos, a quien debo gran parte de lo feliz que soy y porque ...
- Mis hermanos: *Dora, Jaime, Maribel, Alina y Antonio* y sus familias porque de una u otra forma me alentaron a seguir adelante.
- Mis profesores por haber compartido sus conocimientos y experiencias.
- Mi querida *Universidad* ya que en ella he vivido algunos de los momentos más felices de mi vida.
- Todos mis compañeros; especialmente a *Don Beto* por su amistad incondicional y *Arlette* por el bonito equipo que formamos durante la realización de esta tesis.
- Todas las personas que de alguna forma contribuyeron a la realización de esta tesis.

*Lizbeth Hernández González*

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos de manera muy especial a las siguientes personas, de quienes recibimos ayuda para la realización de este trabajo:

- A los profesores del jurado por sus observaciones y sugerencias.
- Q.F.B. Silvia Lilia Tejada C. por todo el apoyo que nos brindó.
- Q. Lilia Vierna G. por todas las enseñanzas a lo largo de este trabajo.
- Q. Isabel Carranco P. por su colaboración en la parte técnica de esta tesis.
- Q.F.B. Luis Alberto Gutiérrez B. por su amistad y paciencia
- I.Q. Cristóbal Aviña G., Lab. Termofísica, F.Q.
- M.en I. José Luis Martínez P. Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Dr. José Reyes. Instituto de Física, UNAM.
- F. Jorge Hernández, Instituto de Física, UNAM.
- Q.F.B. Adriana Mejía, Lab. Microbiología, F.Q.
- Q. Jaime Pérez, Instituto Mexicano del Petróleo.
- I.Q. Joaquín Pérez, Lab. Tecnología Farmacéutica, F.Q.
- Dr. Jorge Romero, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.
- I.Q. Ricardo Pérez, Lab. de Ingeniería Química, F.Q.
- Fundación UNAM.

*Luis Diego  
Arlette Priego  
Lizbeth Hernández*

# INDICE

	pag.
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	1
<b>CAPÍTULO 1. Fundamentos de Corrosión.</b>	7
1.1 Importancia de la corrosión.	10
1.2 Corrosión: breve descripción.	11
1.3 Tipos de daños por corrosión.	14
1.4 Aspectos termodinámicos de la corrosión.	19
1.5 Aspectos cinéticos de la corrosión.	31
1.6 Técnicas para el cálculo de la rapidez de corrosión.	41
<b>CAPÍTULO 2. Fundamentos de Microbiología.</b>	61
2.1 Estructura celular.	64
2.2 Crecimiento y supervivencia de los microorganismos.	67
2.3 Muerte de los microorganismos.	87
2.4 Agentes antimicrobianos.	88
2.5 Bacterias en estudio ( <i>Pseudomonas aeruginosa</i> y <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> ).	92
<b>CAPÍTULO 3. Corrosión Microbiológica.</b>	99
3.1 Relación entre microorganismos y corrosión.	103
3.2 Factores que influyen en la corrosión.	105
3.3 Mecanismos de corrosión biológica.	117
3.4 Corrosión bajo condiciones aerobias.	119
3.5 Corrosión bajo condiciones anaerobias.	123
3.6 Corrosión biológica e industrias involucradas.	127



	pag.
3.7 Corrosión biológica de diferentes materiales.	130
3.8 Evaluación de la corrosión microbiológica.	132
3.9 Uso y limitaciones de las técnicas electroquímicas de corriente directa en la investigación de la corrosión microbiológica.	137
3.10 Prevención y control de la corrosión microbiológica.	143
 <b>CAPÍTULO 4. Material en estudio: ACERO.</b>	 151
4.1 Producción del acero.	154
4.2 Constitución y estructura del acero.	156
4.3 Diagrama de fases del acero.	158
4.4 Fases del acero.	161
4.5 Relación de la estructura del acero con nuestro estudio.	164
4.6 Clasificación de los aceros.	165
4.7 Especificaciones de algunos aceros A.I.S.I.	168
 <b>CAPÍTULO 5. Desarrollo Experimental.</b>	 173
5.1 Desarrollo Experimental.	175
5.2 Experimento A. Corrosión inducida por <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	180
5.3 Experimento B. Corrosión inducida por <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> en medio ATCC-modificado.	180
5.4 Experimento C. Corrosión inducida por <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> en agua de mar sintética.	181
5.5 Mediciones de pH y temperatura.	181
5.6 Mediciones de corriente y potencial.	182
5.7 Pruebas microbiológicas.	185
5.8 Microscopía electrónica.	189

	pag.
<b>CAPÍTULO 6. Resultados y Discusión de Resultados.</b>	191
6.1 <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	193
6.2 <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> en medio de cultivo ATCC-modificado.	230
6.3 <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> en agua de mar sintética.	262
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.</b>	299
7.1 Conclusiones.	301
7.2 Recomendaciones.	302
<b>APÉNDICE 1. Construcción de las Celdas de Corrosión.</b>	305
1A. Preparación de los elementos presentes en las celdas de corrosión.	307
a. Elaboración de los electrodos de trabajo.	307
b. Elaboración de los electrodos para medir pH.	310
1B. Elaboración de las celdas de corrosión en ambiente aerobio.	310
1C. Elaboración de las celdas de corrosión en ambiente anaerobio.	314
<b>APÉNDICE 2. Preparación de los Medios de Cultivo para Cada Experimento.</b>	317
2A. Medio de cultivo específico para <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	319
2B. Medio de cultivo ATCC-modificado específico para <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> .	320
2C. Agua de mar sintética para <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> .	321

**APÉNDICE 3. Técnicas para las Pruebas**

<b>Microbiológicas.</b>	323
3A. Pruebas bioquímicas para <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	325
3B. Técnica nefelométrica.	325
3C. Cuenta de bacterias viables para <i>Pseudomonas aeruginosa</i> .	327
3D. Cuenta de bacterias viables para <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> .	331
3E. Pruebas de actividad para <i>Desulfovibrio desulfuricans</i> .	334

**APÉNDICE 4. Microscopía Electrónica.**

4A. Preparación de las muestras para microscopía electrónica.	343
4B. Limpieza de las muestras.	344

**APÉNDICE 5. Evaluación de la Corrosión por Picado.**

5. Práctica standard para la examinación y evaluación de la corrosión por picado.	347
---	-----

**APÉNDICE 6. Ejemplos Numéricos para Calcular la Rapidez de Corrosión.**

6A. Técnica de pendientes de Tafel.	363
6B. Técnica de resistencia a la polarización.	366

**BIBLIOGRAFÍA.**

# **INTRODUCCIÓN**



Es un hecho que la importancia del fenómeno de la **corrosión**, cobra gran interés en nuestra sociedad, al estar directamente implicado con las pérdidas económicas que resultan de la degradación de los metales, presentes éstos, en casi todas las estructuras que conforman los medios de producción y de consumo (llamense instalaciones, maquinaria, transportes, artículos domésticos, etc.) de los diferentes sectores productivos. La industria en general, tiene equipo e instalaciones que inevitablemente sufren deterioro al estar presentes en ambientes corrosivos de todo tipo; al degradarse algún componente, se tiene que desembolsar cierta cantidad de dinero, lo que implica un costo por las diferentes reparaciones y por el tiempo en que se deja de producir. Estas pérdidas, no solo son de tipo económico, también tienen un costo social.

Para la gran mayoría de la gente, el término **corrosión** significa principalmente oxidación (herrumbre). Oxidación es de hecho, el término más popular para designar a la corrosión del hierro y materiales derivados de él; mientras que **corrosión**, en una acepción más general, es el fenómeno destructivo que afecta a casi todos los materiales.

Hasta principios de este siglo, la corrosión generalmente fue asociada con la presencia de oxígeno y otras sustancias. En 1934 von Wolzogen Kühn y van der Vlugt observaron una severa corrosión en tuberías de hierro en ambientes libres de oxígeno, pero con poblaciones de bacterias, de esta forma se identificó a las bacterias como responsables de la corrosión.

La mayoría de los casos en los cuales los organismos son la causa o un factor de aceleración de la corrosión están involucrados formas localizadas de ataque. Una razón de esto,

es que los organismos algunas veces no forman una película continua en la superficie del metal por lo tanto, si los microorganismos forman depósitos o colonias, el resultado comúnmente va a ser una corrosión localizada.

Las biopelículas en las superficies de los metales producen un ambiente en que la interfase metal-biopelícula es radicalmente diferente al seno del medio en cuanto al pH, oxígeno disuelto y especies orgánicas e inorgánicas.

La corrosión inducida por microorganismos ocurre por mecanismos electroquímicos, el papel de los microorganismos es ayudar a establecer una celda electroquímica (indirectamente) o estimular las reacciones anódicas o catódicas (directamente), es decir, los microorganismos pueden acelerar la rapidez de las reacciones producidas en el proceso de corrosión o alterar los mecanismos de corrosión.

El incremento tan notable de este tipo de problemas, se debe a que ciertos microorganismos que provocan corrosión se encuentran en casi todo ambiente acuoso en la industria. La corrosión microbiológica en las industrias de proceso a menudo se encuentran en tres áreas: sistemas de agua de enfriamiento, tratamiento de aguas de desecho y tuberías o equipo nuevo después de pruebas hidrostáticas. Las estructuras atacadas son tanques almacenamiento, tuberías (internas y externas), bombas y varios equipos industriales donde las reacciones están próximas a la neutralidad, la temperatura es moderada y la cantidad de oxígeno presente es la adecuada.

En México, el desarrollo de la investigación en corrosión microbiológica no ha sido tan extensa como en otros países; por esto y considerando su importancia económica y social se

---

realizó esta tesis para de alguna manera contribuir en este campo de investigación.

Esta tesis es un estudio de la corrosión inducida por bacteria en el acero A.I.S.I. 1010 en condiciones aerobias y anaerobias. Se pretende comparar la corrosión inducida por microorganismos en ambas condiciones, establecer ventajas y desventajas de las técnicas electroquímicas utilizadas (RP y Pendientes de Tafel) y confrontar el efecto de someter los electrodos de trabajo a sólo dos mediciones (al inicio y al final de experimento) y a varias mediciones periódicas.

Para poder comprender satisfactoriamente el fenómeno de la corrosión microbiológica, exploraremos primero conceptos sobre corrosión, microbiología, corrosión microbiológica y el material que se sometió a estudio (acero A.I.S.I. 1010). Posteriormente describiremos el desarrollo experimental para el estudio de corrosión aerobia (inducida por *Pseudomonas aeruginosa*) y los correspondientes a corrosión anaerobia (inducida por *Desulfovibrio desulfuricans*), presentaremos los resultados obtenidos, su discusión, conclusiones y recomendaciones.

# **CAPÍTULO 1**

## **FUNDAMENTOS DE CORROSIÓN**

---



Para la gran mayoría de la gente el término, corrosión, significa principalmente oxidación (herrumbre). Oxidación, es de hecho, el término más popular para designar a la corrosión del hierro y materiales derivados de él, por ejemplo los aceros; mientras que **corrosión**, en una acepción más general, es el fenómeno destructivo que afecta a casi todos los metales.

La historia nos cuenta que los primeros metales utilizados con sentido práctico, fueron el oro y el cobre, debido principalmente a que estos se encuentran en forma pura en la naturaleza. El oro resultó demasiado suave para ser usado en la fabricación de herramientas y armas, pero en cambio, el cobre se utilizó de forma importante para dichos fines, esto alrededor del año 8000 A.C. Por el año 4000 A.C. los Egipcios descubrieron la forma de obtener el cobre a partir de los minerales adecuados, calentándolos dentro de un horno; mientras que cerca del año 3000 A.C., se descubrió que las aleaciones del cobre con el estaño producían armas y herramientas más resistentes.

El descubrimiento del hierro marca una etapa importantísima en la historia de la civilización, ya que además de ser uno de los más abundantes en la corteza terrestre (4.7%), supera en muchos aspectos mecánicos (ductilidad, maleabilidad, dureza, etc.) a otros metales, confiriéndole una sobresaliente importancia tecnológica. Por ello, no es de extrañar la importancia que tiene la corrosión de este metal. El interés que tiene este fenómeno lo podemos enfocar desde varias categorías, las cuales, se describen brevemente en el siguiente apartado.

## 1.1 IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN.

Es un hecho que la importancia del fenómeno **corrosión**, cobra gran interés en nuestra sociedad, al estar directamente implicada con las pérdidas económicas que resultan de la degradación de los metales presentes éstos, en casi todas las estructuras que conforman los medios de producción y de consumo (llámense instalaciones, maquinaria, transportes, artículos domésticos, etc.) de los diferentes sectores productivos de la misma.

En un caso hipotético (pero muy factible), veamos que sucedería si se presentará una fuga, debida a corrosión, en un oleoducto que pasa cerca de algún campo de cultivo.

En este caso se tendrían las siguientes consideraciones económicas y sociales :

- a. Costos por reposición de la pieza corroída.
- b. Costos por reparación y mantenimiento.
- c. Costos por indemnización al agricultor.
- d. Costos implicados en la biorremediación del terreno.
- e. Costos por dejar de producir, tanto en la producción del crudo, así como en los campos de cultivo.
- f. Pérdida de recursos naturales.
- g. Costos ambientales implicados en la generación de desechos peligrosos.
- h. Pérdida de bienes humanos de todo tipo, incluso pérdida de vidas en un caso extremo.

Es evidente que el fenómeno de corrosión es causa de una

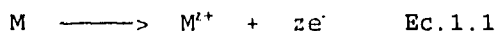
vasta cantidad de daños económicos, sociales, ambientales, así como de un gran agotador de recursos naturales. Tan sólo la industria acerera Estadounidense genera alrededor de 3.5 millones de toneladas al año de óxidos de desecho que contienen metales pesados como el plomo; la disposición final de estos óxidos de desecho en un relleno sanitario, si es que no se opta por el reciclaje, tendrían un costo de entre 20 y 30 dólares por tonelada (Ref. 26). El impacto ambiental por la producción de acero (elaborado para construir nuevas infraestructuras y reponer las dañadas) se ve acentuado al desecharse a la atmósfera miles de toneladas de dióxido de carbono, producto de los 350-600 kilos de carbón utilizados para producir una tonelada métrica de acero (Ref. 26). De allí, se puede ver la trascendencia de los estudios relacionados con el fenómeno de corrosión.

## **1.2 CORROSIÓN : BREVE DESCRIPCIÓN.**

El fenómeno de **corrosión**, que consiste en el ataque químico del medio ambiente sobre los metales, está estrechamente relacionado con la actividad química de los mismos. El tipo de corrosión más común se debe a la acción simultánea de la atmósfera, el agua y diversas sustancias disueltas en la mismas. En esencia, la corrosión es una reacción en la cual un metal se oxida, produciendo una disolución de la pieza. En muchos casos, la reacción es de naturaleza definitivamente electroquímica e implica el tipo de transferencia de electrones característico de las celdas galvánicas.

Un metal en contacto con una solución se corroerá si existe una especie química en solución que pueda reducirse con un potencial de reducción más positivo que el del metal. El metal entonces actúa como ánodo, generalmente en puntos aislados debidos a irregularidades de su superficie o de la solución.

Un esquema simple del proceso de corrosión puede explicarse tomando como base un átomo metálico. Cuando un átomo metálico experimenta una reacción de corrosión, éste se convierte en ion mediante una reacción con especies presentes en el medio ambiente. Si usamos el símbolo M para denotar a un átomo metálico dentro de su estructura sólida, se puede representar el fenómeno de corrosión con la siguiente ecuación:



Donde, z, generalmente tiene los valores 1, 2, o 3. Se puede encontrar valores de z más grandes, pero estos son raros. La ecuación 1.1 es la forma más general de una **reacción de corrosión** y establece que los átomos metálicos pueden perder más de un electrón.

Aunque la ecuación 1.1 es correcta, no representa un proceso completo, acorde con el principio de la electroneutralidad<sup>1</sup>. El ion positivo se genera a partir de una especie neutra, mientras que el ion negativo no se creó de esta forma. A la ecuación 1.1 se le llama "media

---

<sup>1</sup> El Principio de la Electroneutralidad establece que si se crea un ion positivo, también debe crearse un ion negativo para mantener la neutralidad del sistema.

reacción", ya que no es la reacción global. Una consecuencia del principio de la electroneutralidad es el de no poder crear electrones libres, por lo que ellos deben ser consumidos por otras sustancias presentes en el medio. Por lo tanto, se generan iones negativos para balancear las cargas de los iones positivos. La formación de aniones en los procesos de corrosión pueden desarrollarse en lugares bastante alejados del sitio donde se corroe el metal.

Una definición más completa del concepto de **corrosión**, acorde con la mayoría de los documentos acerca del fenómeno, es la siguiente (Ref. 44) :

"Corrosión es la reacción química o electroquímica entre un material, generalmente un metal, y su medio ambiente que como consecuencia produce un deterioro del mismo y sus propiedades".

Podemos resaltar algunos de los puntos tocados en esta definición de la siguiente forma :

a) El fenómeno de Corrosión está relacionado con los metales. Esto significa que únicamente la media reacción de la ecuación 1.1 puede ser una verdadera reacción de corrosión. La segunda media reacción describe un proceso mediante el cual la reacción de corrosión no se desarrolla, pero que no es en si misma una reacción de corrosión.

b) Al usar la palabra "deterioro" se asume que la corrosión es un proceso indeseado.

c) La degradación de los metales involucra no sólo reacciones químicas, sino también reacciones electroquímicas.

que en algunos ambientes, llegan a ser de mayor importancia. Dado que las reacciones electroquímicas involucran la transferencia de electrones, este tipo de reacciones pueden ser influenciadas por el potencial eléctrico.

d) El ambiente es el nombre que se le da a todas las especies que rodean al metal que se corroe al tiempo en que se desarrolla dicho proceso.

### **1.3 TIPOS DE DAÑOS POR CORROSIÓN.**

Como se mencionó al inicio, frecuentemente se piensa en el fenómeno de corrosión en términos de oxidación. Sin embargo, los daños por corrosión también ocurren en otras formas, resultando, por ejemplo, en fallas por fractura o por pérdida de dureza o ductibilidad. En general, la mayoría de estos daños ocurren por mecanismos electroquímicos, aunque los productos de corrosión no siempre se observan a simple vista y la pérdida de peso del metal puede no ser apreciable. Los cinco principales tipos de corrosión clasificados con respecto a su apariencia exterior y/o por la alteración en sus propiedades físicas, son las siguientes :

#### **1.3.1 ATAQUE UNIFORME.**

Este incluye al proceso comúnmente conocido como oxidación del hierro o al ennegrecimiento de la plata. El deslustre del níquel y la oxidación uniforme en la superficie entera de

los metales a alta temperatura son otros ejemplos del ataque uniforme.

La rapidez de este ataque uniforme suele reportarse en varias unidades. Una terminología aceptada es la que reporta esta rapidez en milímetros de penetración por año (mmpa) y en gramos por metro cuadrado por día (gmd). Por ejemplo, el acero en agua de mar tiene una rapidez de corrosión uniforme cercana 0.13 mmpa o 2.5 gmd. Estos valores son un promedio de varias medidas a través del tiempo de prueba. Generalmente, en el ataque uniforme, la rapidez de corrosión inicial es mayor que las subsecuentes.

### **1.3.2 CORROSIÓN POR PICADO.**

Este es un tipo de ataque localizado donde la rapidez de corrosión es más grande en unas áreas que en otras. Si el ataque está confinado a un área fija, relativamente pequeña, que actúa como ánodo, la picadura resultante se conoce como picadura profunda. Si el área de ataque es relativamente grande y poco profunda, se le llama picadura superficial. La profundidad de la picadura, algunas veces se expresa en términos del factor de picadura. Esta es la razón entre la penetración más profunda y la penetración promedio que se determina por la pérdida de peso del espécimen. El factor de picadura por unidad, tiene un significado similar al ataque uniforme.

Ejemplos de este tipo de corrosión son : el hierro colado dentro del suelo que se corroe por la formación de picaduras superficiales y el acero inoxidable sumergido en agua de mar que se corroe por la formación de picaduras

profundas. Muchos metales, cuando son expuestos a líquidos a alta velocidad, experimentan un tipo de corrosión llamada ataque por choque o algunas veces corrosión-erosión.

La corrosión por calado (fretting corrosión), es aquella que resulta por un movimiento relativamente suave (como una vibración) de dos sustancias en contacto, una o ambas pueden ser metales, lo que conduce a una serie de picaduras en la interfase metálica.

La corrosión debido a la erosión por cavitación, resulta de la formación y el colapso de burbujas de vapor en una interfase dinámica metal-líquido (como en los rotores de bombas), lo que causa una secuencia de picaduras, algunas veces tomando la apariencia de un panal de abejas con pequeñas fisuras.

### **1.3.3 DEZINCIFICACIÓN Y CORROSIÓN PARCIAL.**

La dezincificación es un tipo de ataque que afecta a las aleaciones de zinc (por ejemplo, latón amarillo), en el cual el zinc se corroe preferentemente, dejando como residuo un cobre poroso y productos de corrosión. La aleación así corroída, frecuentemente retiene su forma original, pero resulta dañada de forma apreciable en su dureza y ductilidad.

La corrosión parcial es similar a la dezincificación, pero en esta pueden corroerse más de un componente de la aleación, dejando un residuo poroso que puede retener su forma original. Bajo este tipo de corrosión generalmente se clasifica el ataque que sufren las aleaciones de metales nobles.



profundas. Muchos metales, cuando son expuestos a líquidos a alta velocidad, experimentan un tipo de corrosión llamada ataque por choque o algunas veces corrosión-erosión.

La corrosión por calado (fretting corrosión), es aquella que resulta por un movimiento relativamente suave (como una vibración) de dos sustancias en contacto, una o ambas pueden ser metales, lo que conduce a una serie de picaduras en la interfase metálica.

La corrosión debido a la erosión por cavitación, resulta de la formación y el colapso de burbujas de vapor en una interfase dinámica metal-líquido (como en los rotores de bombas), lo que causa una secuencia de picaduras, algunas veces tomando la apariencia de un panal de abejas con pequeñas fisuras.

### **1.3.3 DEZINCIFICACIÓN Y CORROSIÓN PARCIAL.**

La dezincificación es un tipo de ataque que afecta a las aleaciones de zinc (por ejemplo, latón amarillo), en el cual el zinc se corroe preferentemente, dejando como residuo un cobre poroso y productos de corrosión. La aleación así corroída, frecuentemente retiene su forma original, pero resulta dañada de forma apreciable en su dureza y ductilidad.

La corrosión parcial es similar a la dezincificación, pero en esta pueden corroerse más de un componente de la aleación, dejando un residuo poroso que puede retener su forma original. Bajo este tipo de corrosión generalmente se clasifica el ataque que sufren las aleaciones de metales nobles.

### 1.3.4 CORROSIÓN INTERGRANULAR.

Este es un tipo de ataque localizado en los límites de grano de un metal, que resulta en una pérdida de dureza y ductilidad. El conjunto del límite de grano y el área del grano, funcionan como una celda electroquímica, esto es, el material del límite de grano es un área limitada que actúa como ánodo, mientras que las grandes áreas de los granos actúan como cátodos. Este ataque, frecuentemente, es rápido, penetrando profundamente dentro del metal, causando algunas veces fallas catastróficas. Un ejemplo de ataque intergranular no electroquímico, es el ataque que sufre el níquel en una atmósfera sulfurosa, esto se debe a que el sulfuro penetra a través de los límites de grano.

### 1.3.5 CORROSIÓN POR FRACTURA.

Si un metal se fractura cuando se expone a una tensión repetida o alterna en un ambiente corrosivo, se dice que éste falla por haber sufrido una corrosión por fatiga. En ausencia de un ambiente corrosivo, el metal bajo una tensión similar, pero a valores inferiores de la tensión crítica (llamada fatiga límite), no falla por fatiga, aún después de aplicarsele un número muy grande de ciclos.

Si a un metal, se le aplica una tensión constante y se le expone simultáneamente a un ambiente corrosivo específico, éste se fractura rápidamente o después de un tiempo dado, a la falla se le denomina fractura por corrosión bajo tensión. La fuerza quizá sea de origen residual debido al trabajo en frío o por algún tratamiento en calor o, tal vez, de origen

externo. Las fracturas observadas son intergranulares o transgranulares, dependiendo del metal y del ambiente corrosivo. Las fallas de este tipo difieren básicamente de la corrosión intergranular, en que esta última procede sin que al metal se le someta a una tensión.

Casi todos los metales estructurales (por ejemplo, aceros al carbón y bajos en aleación, bronce, acero inoxidable, duraluminio, aleaciones de titanio, magnesio, níquel y muchos otros) están sujetos a las fracturas por corrosión bajo tensión en algunos ambientes. Afortunadamente, para experimentar este tipo de corrosión, los ambientes corrosivos están restringidos a pocos agentes químicos y la tensión debe ser lo suficientemente grande para rebasar la fatiga límite.

La figura 1.1 muestra algunos esquemas típicos de los tipos de corrosión que se han mencionado.

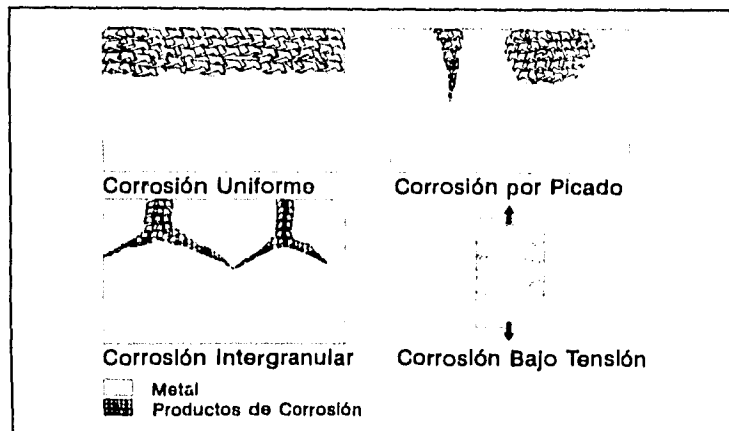


Fig. 1.1 Tipos de daños por corrosión.

## 1.4 ASPECTOS TERMODINÁMICOS DE LA CORROSIÓN.

Es un hecho que todos los procesos de la naturaleza están condicionados por los cambios energéticos que sufren los sistemas presentes en ella; es por ello que el hombre, buscando explicar de manera lógica las relaciones entre las diferentes clases de energía, sus manifestaciones, así como las leyes que rigen las transformaciones de un tipo en otro, dió origen a lo que hoy conocemos como Termodinámica. Y es precisamente dentro de esta ciencia donde encontramos un principio muy sencillo el cual está relacionado con la espontaneidad y reversibilidad de los procesos, éste se puede enunciar de la siguiente forma :

Todas las interacciones entre elementos y compuestos  
están gobernadas por los cambios de energía libre  
de la que ellos disponen.

De esta forma podemos ver que la energía libre es el factor que determina cuando un proceso de corrosión se llevará a cabo espontáneamente.

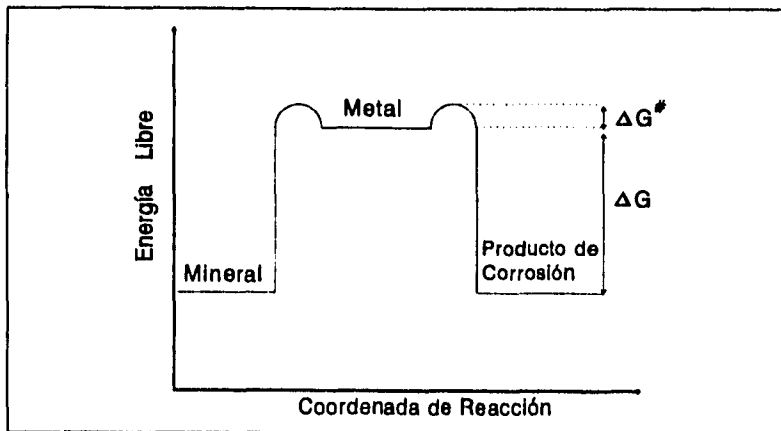
Una reacción se llevará a cabo espontáneamente, si hay una disminución neta de la energía libre del sistema.<sup>b</sup>

---

<sup>b</sup> El cambio individual de energía libre de las especies será expresado como  $G$  y el cambio neto de energía en la reacción estará dado por  $\Delta G$ .

Acorde con nuestra noción de que los cambios naturales involucran una transición de un estado energético superior a uno inferior, suele denotarse por un signo negativo al sistema que cede energía, y por un signo positivo al sistema que absorbe energía. Así para una reacción espontánea, el  $\Delta G$  debe ser negativo.

En la figura 1.2 podemos ver que el metal se corroerá espontáneamente, si el cambio en  $G$  es negativo.

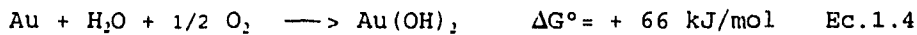
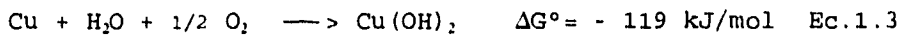
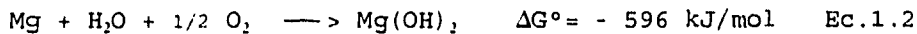


**Fig. 1.2** Diagrama de energía para los metales y sus compuestos.

A temperatura ambiente la mayoría de los compuestos químicos de los metales (minerales) tienen valores de  $G$  inferiores a la de los metales puros, por ello la premisa es:

La mayoría de los metales tienen una  
tendencia inherente a corroerse.

Sin embargo, existen algunos metales, como el oro y el platino, que no sufren corrosión. La teoría ha desarrollado dos interpretaciones para explicar este fenómeno. La primera se basa en cambios, quizá, poco favorables. Si se consideran las siguientes reacciones y sus respectivos cambios de energía libre standard por mol :



Los datos de energía libre muestran claramente que el cobre y el magnesio tienen valores negativos de  $\Delta G^\circ$ , mientras que el del oro es positivo. Así, la termodinámica sólo nos dice que el cobre y el magnesio se corroerán en atmósferas aireadas y húmedas, mientras que el oro no tendrá ningún cambio. La segunda explicación se basa en que la energía libre de activación, tal vez, sea demasiado grande, provocando una rapidez de reacción muy baja.

Pero no sólo los metales preciosos pueden permanecer sin corroerse en la naturaleza. Se han encontrado objetos de hierro en excelente condición después de estar por siglos sumergidos en el fondo de algún pantano. Esto debido a que en esos sitios se tiene una exclusión casi total de oxígeno y de algunas otras sustancias que promueven el proceso de corrosión. Éste es un buen ejemplo, que nos recuerda la importancia que tiene el ambiente en el fenómeno de corrosión.

Como vimos anteriormente, hace muchos años se estableció claramente que cuando un metal se corroe en una solución acuosa, éste desarrolla en su superficie sitios anódicos y catódicos. Estos sitios, en un caso, podrían estar permanentemente separados uno del otro, pero en otros casos la superficie íntegra quizá consista de sitios anódicos y catódicos que estén cambiando continuamente, de tal suerte que cualquier punto de la superficie puede ser alternativamente anódico y catódico durante el tiempo en que ocurre el proceso de corrosión. Una descripción muy simple de este proceso sería cuando se sumerge un metal en un electrólito. Para ilustrarlo, veamos que sucedería al sumergir una pieza de hierro en una solución al 10% de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ), figura 1.3. Después de 10 minutos, se apreciaría un depósito de cobre sobre la superficie del hierro y al analizar la solución se encontrarían trazas de hierro en forma iónica.

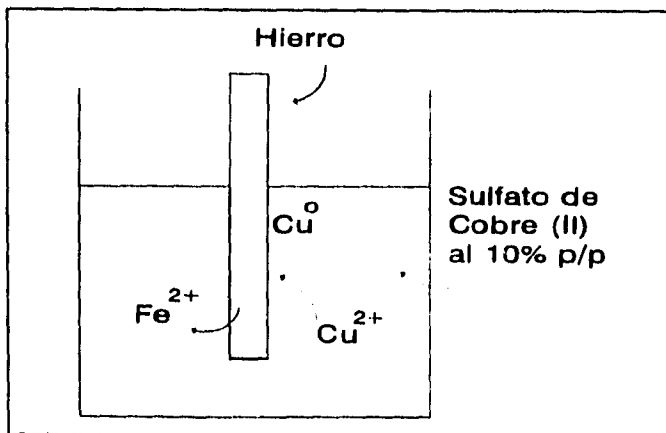
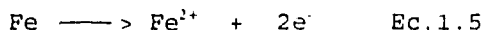
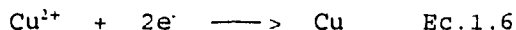


Fig. 1.3 Corrosión del hierro.

El proceso que se lleva a cabo, no es otro más que la corrosión del hierro, en otras palabras, el metal se transforma a su forma iónica de acuerdo con la siguiente ecuación :

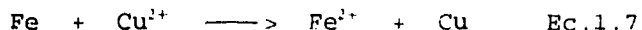


En contraste, el cobre pasa de su forma iónica desde la solución, a su forma elemental manifestándose como depósito sobre la superficie del hierro :



Esta reacción catódica es el inverso de la reacción de corrosión, aunque, como se hizo notar anteriormente, no todos los procesos catódicos son así.

El efecto completo se representa como la suma de las dos reacciones :

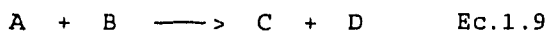


Dado que la reacción 1.7 procede de manera espontánea, es de esperarse que el  $\Delta G$  del proceso global disminuya ( $\Delta G < 0$ ). Todos los procesos de corrosión son dependientes de la temperatura, debido que las energías libres de las especies que interactúan en dicho fenómeno son, a su vez, dependientes de la temperatura; por lo que es importante ser capaz de calcular el valor de  $\Delta G$  a cualquier temperatura. Esto es posible a partir de la ecuación termodinámica :

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln K \quad \text{Ec.1.8}$$



Donde K está definida para una reacción, en forma general, de la siguiente manera:



$$K = \frac{[C] \cdot [D]}{[A] \cdot [B]} \quad \text{Ec.1.10}$$

La expresión que define a K, contempla cualquier valor de las especies en condiciones fuera del equilibrio y, que al mismo tiempo, corresponden al cambio de energía libre a las mismas condiciones,  $\Delta G$  está definido por la ecuación 1.8. Si el sistema alcanza un punto donde no se aprecie un cambio neto en la energía libre, se dice que el sistema está en equilibrio y que  $\Delta G = 0$ . Por lo tanto,  $K = K_{eq}$ , donde  $K_{eq}$  es la constante de equilibrio. Lo que conduce a la ecuación :

$$\Delta G^\circ = -RT \ln K_{eq} \quad \text{Ec.1.11}$$

En el caso del sistema cobre/hierro, podemos utilizar la ecuación 1.10 para sustituirla por K en la ecuación 1.8, lo que resulta en :

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \ln \frac{[Fe^{2+}] \cdot [Cu]}{[Cu^{2+}] \cdot [Fe]} \quad \text{Ec.1.12}$$

Los términos dentro de los paréntesis cuadrados en la ecuación 1.12, representan las concentraciones de las especies involucradas en la reacción de corrosión; las

unidades deben estar en mol/l.<sup>o</sup> Se puede simplificar la ecuación 1.12 si se recuerda que la concentración de un sólido es igual a la unidad, dando :

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad \text{Ec.1.13}$$

Para hacer práctica la medición del cambio de energía libre del sistema y facilitar el estudio de la corrosión, se utilizó la ecuación desarrollada por Michael Faraday, que relaciona el cambio de energía libre con el potencial eléctrico:

$$\Delta G = - z F E \quad \text{Ec.1.14}$$

La ecuación 1.14 se conoce como la Ley de Faraday, que expresa el trabajo realizado por el sistema en términos de la diferencia de potencial y la carga transportada. En dicha ecuación, el símbolo F representa la carga transportada por un mol de electrones, cuyo valor es 96,494 coulomb por mol. E es el potencial eléctrico medido en volt y z es el número de electrones transferidos en la reacción de corrosión; en el ejemplo del hierro, z es igual a 2. El signo negativo es necesario para indicar la carga negativa de los electrones.

Utilizando el símbolo (°) para representar que se tienen condiciones standard, se puede reescribir la ecuación 1.14 como:

$$\Delta G^{\circ} = - z F E^{\circ} \quad \text{Ec.1.15}$$

---

Es más correcto el uso de la cantidad llamada "actividad", en lugar del uso de concentraciones molares, pero para fines de demostración es más conveniente el uso de la última.

Sustituyendo las ecuaciones 1.14 y 1.15 en la ecuación 1.13 se obtiene :

$$- zFE = - zFE^{\circ} + RT \ln \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad \text{Ec.1.16}$$

y reescribiendo la ecuación 1.16, tenemos :

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{zF} \ln \frac{[\text{Fe}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]} \quad \text{Ec.1.17}$$

Esta ecuación puede expresarse en forma más general como :

$$E = E^{\circ} - \frac{RT}{zF} \ln \frac{[\text{productos}]}{[\text{reactivos}]} \quad \text{Ec.1.18}$$

La ecuación 1.18 es conocida como la ecuación de Nernst y es extremadamente importante, ya que tiene un gran significado teórico y práctico. Como consecuencia, es común introducir valores numéricos en la ecuación. Refiriendo la ecuación a la temperatura de 298.15 K, haciendo uso de  $R=8.3143 \text{ J/molK}$  y convirtiendo los logaritmos de base natural a base decimal, la ecuación 1.18 se transforma a :

$$E = E^{\circ} - \frac{0.059}{z} \log \frac{[\text{productos}]}{[\text{reactivos}]} \quad \text{Ec.1.19}$$

$E$  es el potencial eléctrico fuera de condiciones de equilibrio generado por el desarrollo de la reacción,  $[\text{reactivos}]$  y  $[\text{productos}]$  vienen a ser las concentraciones

de los reactivos y la de los productos respectivamente. Si se seleccionaran las concentraciones de equilibrio, no habría fuerza promotora alguna ( $\Delta G = 0$ ) y  $E$  sería cero. Una forma típica de la ecuación de Nernst utilizada en la determinación de los potenciales de electrodo, cuando éste actúa como cátodo, es la siguiente :

$$E = E^{\circ} + \frac{0.059}{z} \log [ M'^{+} ] \quad \text{Ec.1.20}$$

### 1.4.1 POTENCIALES DE CELDA.

No hay duda de que el desarrollo de la ecuación de Nernst facilitó el estudio del fenómeno electroquímico en las celdas de corrosión, sin embargo, un pequeño inconveniente presente en ella es que se tiene que conocer el valor del Potencial de Electrodo standard ( $E^{\circ}$ ) para así determinar la espontaneidad de un proceso dado. De allí que los científicos encauzaran su trabajo en la obtención de valores confiables de  $E^{\circ}$ .

Como se sabe,  $E^{\circ}$  es en realidad una diferencia de potencial, así que el primer paso que se dió fue referir dicha diferencia a un electrodo de potencial estable, y así, poder hablar en términos de potenciales absolutos. Por razones históricas, se tomó como electrodo de referencia al electrodo de hidrógeno, dándole un potencial de 0.00 V, cuando se tienen las condiciones de 1 atm de presión para el gas hidrógeno y una solución de iones hidronio de actividad unitaria.

Al inicio de esta sección se dijo que  $\Delta G$  (y por lo

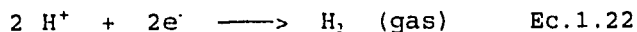
tanto E) depende de la temperatura,<sup>4</sup> por ello para establecer los valores de E° se tomó el valor 298.15 K como temperatura de referencia.

Como ejemplo de lo anterior, se puede analizar el procedimiento para obtener el valor de E° para la reacción de disolución del hierro cuando se usa el electrodo de hidrógeno como electrodo de referencia, figura 1.4. Las reacciones involucradas son las siguientes :

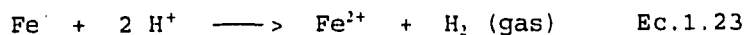
a. Disolución del hierro.



b. Formación de hidrógeno.



c. Reacción global.



Sustituyendo en la ecuación de Nernst :

$$E = E^\circ - \frac{RT}{zF} \ln \frac{[\text{Fe}^{2+}] [\text{H}_2]}{[\text{Fe}] [\text{H}^+]^2} \quad \text{Ec.1.24}$$

Recordando que las condiciones del electrodo de hidrógeno, [H<sup>+</sup>] y [H<sub>2</sub>] son iguales a la unidad, [Fe] también se aproxima a la unidad, y si el sistema está a la

---

<sup>4</sup> La variación de la energía libre por cambios de la presión en sistemas incompresibles es despreciable, por lo que no se toma en cuenta.

temperatura de 298.15 K, se obtiene :

$$E = E^{\circ} - \frac{0.0592}{2} \log [\text{Fe}^{2+}] \quad \text{Ec.1.25}$$

Si el electrodo está sumergido en una solución de sus propios iones de concentración 1 M, entonces el término logarítmico se elimina y resulta que la diferencia de potencial del sistema es igual al potencial de electrodo standard,  $E^{\circ}$ .

$$E = E^{\circ} \quad \text{Ec.1.26}$$

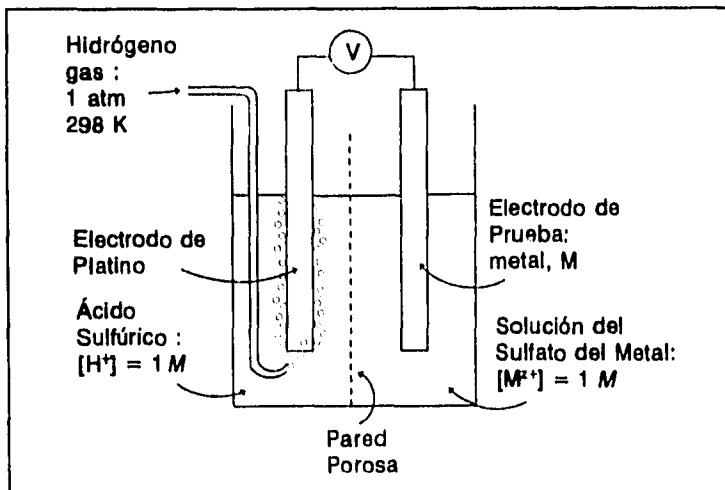


Fig. 1.4 Determinación de los potenciales standard de electrodo.

De manera similar se pudieron obtener los valores de  $E^\circ$  para otros metales con lo que se creó una tabla de Potenciales Standard de Electrodo. Por convención estos potenciales se expresan como potenciales de reducción, y se les denomina Potenciales Standard de Reducción, tabla 1.1.

Reacción de Electrodo	$E^\circ$ (volt)
$\text{Au}^+ + e^- = \text{Au}$	+1.68
$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	+0.80
$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	+0.34
$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.14
$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.44
$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.76
$\text{K}^+ + e^- = \text{K}$	-2.92

Tabla 1.1 Potenciales de Reducción Standard.

Con estos potenciales de electrodo, pueden calcularse de forma práctica valores teóricos de potenciales de celda sin necesidad de realizar una experimentación directa. Por ejemplo para una celda que tiene un electrodo de zinc y un cátodo de cobre sumergidos individualmente en una solución de sus propios iones se tendría :



El potencial de celda,  $E_{\text{celda}}$ , estará dado por la diferencia de los potenciales de electrodo standard de reducción, esto es, el potencial de la especie oxidante menos el de la especie reductora, expresado como ecuación :

$$E_{\text{celda}} = E_{\text{oxd}} - E_{\text{red}} \quad \text{Ec.1.30}$$

En este caso la especie oxidante es el cobre (ya que sus iones se reducen) y la especie reductora es el zinc (ya que el electrodo de zinc es el que se oxida), por lo que se tiene :

$$E_{\text{celda}} = E_{\text{Cu}} - E_{\text{Zn}} \quad \text{Ec.1.31}$$

$$E_{\text{celda}} = 0.34\text{V} - (-0.76\text{V}) = +1.10\text{V} \quad \text{Ec.1.32}$$

Por simple sustitución del valor de 1.10V en la ecuación de Faraday, podemos ver que se el valor de  $\Delta G$  es negativo, por lo que la reacción será espontánea. De igual forma se pueden tratar diversos pares ánodo-cátodo para tener información acerca de la espontaneidad del proceso.

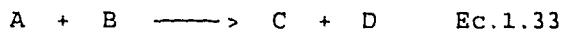
## 1.5 ASPECTOS CINÉTICOS DE LA CORROSIÓN.

Como vimos en la sección anterior, el fenómeno de corrosión es un problema que está gobernado por los cambios energéticos que sufre la materia; además, podemos añadir que su fuerza motora proviene de la "energía química" que posee.



Esta se deriva de la energía almacenada dentro de los enlaces químicos que todas las sustancias poseen, a la cual se le conoce como la "energía interna" del sistema. Únicamente una proporción de esta energía es útil para desarrollar trabajo (energía aprovechable), el que puede ser utilizado para mover máquinas, o en el peor caso, para promover los agentes destructivos que causan las reacciones de corrosión. A esta clase de energía disponible, como vimos en la sección anterior, se le conoce como "energía libre".

La Teoría del Estado de Transición es un concepto importante que facilita la explicación de la rapidez de las reacciones de corrosión. Considerando la siguiente ecuación:



Esta ecuación nos describe el proceso mediante el cual, dos especies, A y B, llamadas reactivos, interactúan para formar dos nuevas especies, C y D, llamadas productos. Es esencial que las especies A y B entren en contacto físico, para así formar una especie intermedia, AB. Esto quizá suceda sólo por unos instantes, pero es precisamente cuando los reactivos poseen la suficiente energía y la orientación correcta para dar paso a los productos. El espacio en el que se desarrolla la especie AB es el llamado "estado de transición". Podemos describir este proceso más claramente utilizando un diagrama en el que se relacionan los cambios de energía libre (eje de las ordenadas) con el desarrollo de la reacción (eje de las abscisas), figura 1.5.

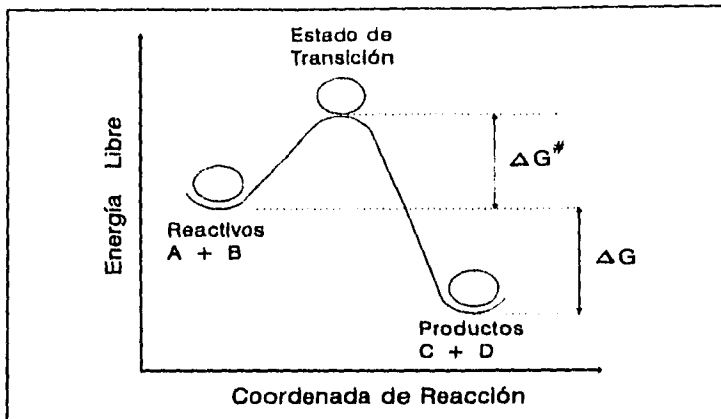


Fig. 1.5 Diagrama de energía para la reacción en la que A+B se convierte en C+D vía el Estado de Transición.

La teoría nos dice que el estado de transición debe tener un nivel energético mayor que la suma de las energías libres de las especies separadas, A y B. Tradicionalmente, a esta cantidad se le da el símbolo  $\Delta G^\ddagger$ . Como estamos considerando una reacción espontánea, las energías de los productos, C y D, deben ser menores a la de los reactivos, A y B, por lo que el cambio global de energía en la reacción viene dada por la cantidad  $\Delta G$ . Una vez formado el estado de transición, éste puede revertirse hacia reactivos, o bien, puede progresar hacia productos. Como al cambiar a las especies, C y D, se alcanza el mínimo nivel de energía libre en el sistema, éste es el cambio que se ve favorecido.

Una forma muy simple de expresar la rapidez de la reacción de corrosión es :

$$\text{rapidez} = \text{constante de rapidez} \times [\text{reactivos}] \quad \text{Ec.1.34}$$

Donde los paréntesis cuadrados denotan cantidad de sustancia. La constante de rapidez puede expresarse como función del tamaño de la barrera de energía libre de transición (también llamada de activación):

$$\text{constante de rapidez} = A \exp ( -\Delta G^\ddagger / RT ) \quad \text{Ec.1.35}$$

Donde, A es el factor preexponencial y R es la constante universal de los gases y T es la temperatura absoluta. Por inspección de la ecuación 1.35, vemos que si la temperatura aumenta, también la constante de rapidez aumenta (y por lo tanto la rapidez de la reacción), pero cuando el tamaño de la barrera ( $\Delta G^\ddagger$ ) se incrementa la constante de rapidez decrece. La ecuación 1.35 es una forma modificada de la Ecuación de Arrhenius.

Ahora, si consideramos el proceso inverso, podemos darnos cuenta que no se dará una reacción espontánea, ya que hay un incremento de la energía libre sobre la conversión de las especies, C y D, a las especies, A y B; y aún más, la barrera que necesitan cruzar esos nuevos reactivos es más grande que la del proceso original.

Sin embargo, la Teoría del Estado de Transición, no descarta el proceso inverso, pero especifica que éste se dará a una rapidez menor, quedando representado de forma similar a la ecuación 1.35, en la que la energía libre ha sido aumentada de un  $\Delta G^\ddagger$  a un  $(\Delta G^\ddagger + \Delta G)$ . El proceso inverso es posible únicamente a nivel molecular donde las energías de un par individual C y D sean de tal forma que alcancen para formar el estado de transición.

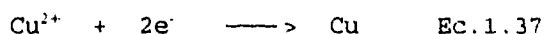
Si consideramos una situación hipotética en la que una

pieza de cobre, de área unitaria, se sumerge en un recipiente con agua pura. Inmediatamente se daría una situación como la que describe la figura 1.6 (a). En ésta, se ve que el ambiente posee suficiente energía disponible para inducir un flujo de átomos de cobre sobre la "barrera de energía" y producir la forma iónica del cobre. El cobre comienza a disolverse (corroerse) y la concentración de sus iones en el agua, inicialmente cero, va incrementándose lentamente :

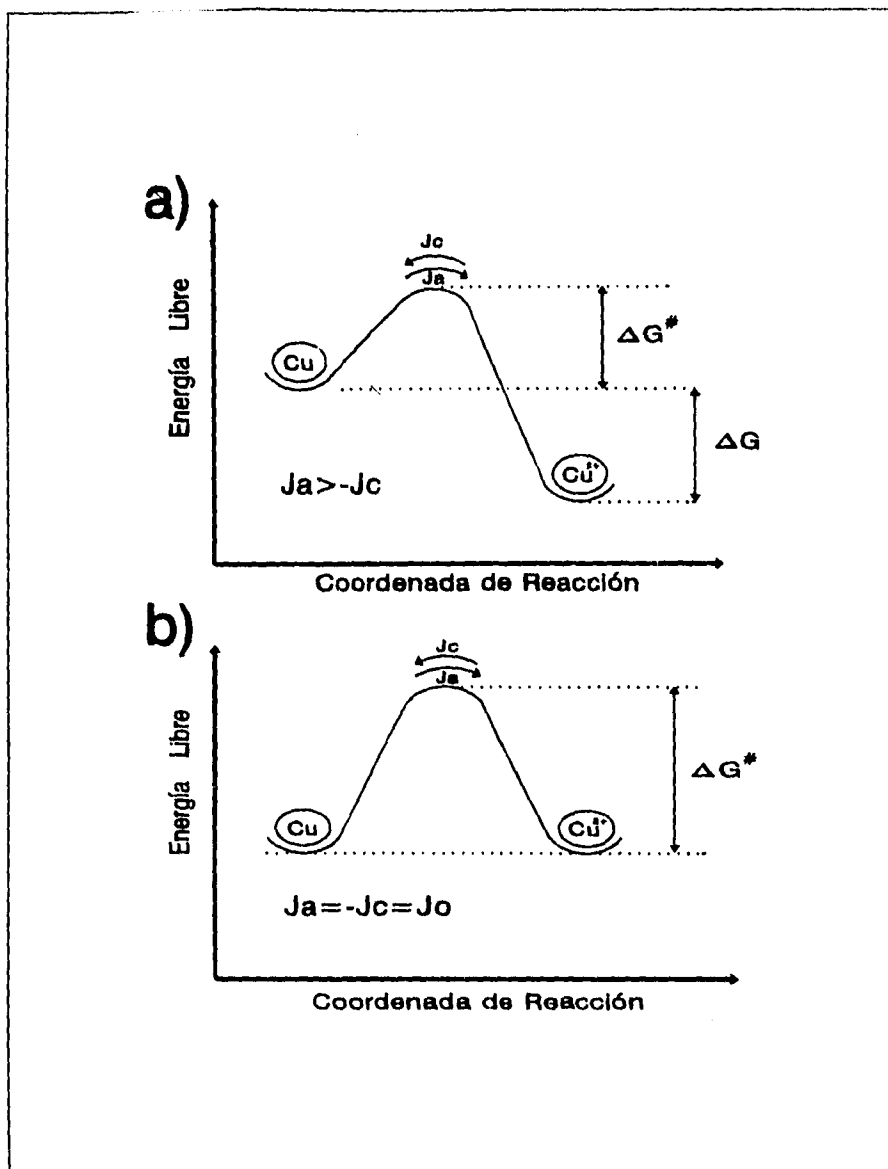


Como hemos visto, la tendencia del cobre a corroerse decrece cuando la corriente se incrementa desde cero, y el valor de  $\Delta G$  disminuye junto con el potencial, acorde con la Ley de Faraday. Las energías de átomo metálico y la del ion tienden a igualarse.

Como se explicó anteriormente, la rapidez de la reacción disminuye cuando la energía libre de activación aumenta. Así es que, tan pronto como los iones de cobre estén presentes en la solución, se presenta la posibilidad de que estos regresen sobre la barrera y se depositen sobre el metal :



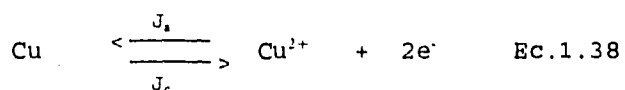
La rapidez de la reacción 1.37 está gobernada por la energía libre de activación en la dirección inversa, una cantidad inicialmente mayor que la de la reacción 1.36. Sin embargo, el tamaño de las barreras de energía libre disminuye cuando las energías de las dos especies se aproximan una a la otra y la reacción inversa (Ec. 1.37) se vuelve significativa. La rapidez de la reacción 1.36, por otro lado, decrece debido a que su energía libre de activación aumenta. La situación que



**Fig. 1.6** a) Diagrama de energía para el cobre en agua pura:  $J_a > -J_c$ . b) Diagrama de energía para el cobre en equilibrio con una solución de sus iones divalentes:  $J_a = -J_c = J_o$ .

se presenta, es el desarrollo de un equilibrio en el sistema al igualarse la rapidez de la reacción anódica con la catódica, figura 1.6 (b).

Usando  $J_a$  e  $J_c$  para denotar las densidades de corriente de las reacciones anódica y catódica, respectivamente, podemos reescribir las ecuaciones 1.36 y 1.37 como :



Cuando se alcanza la condición de equilibrio,  $J_a = -J_c$ , y no se da un flujo neto de corriente, de hecho, existe un flujo de corriente, pero es igual y opuesto en ambas direcciones, el cual no puede ser medido. A éste se le conoce como "corriente de intercambio" y se denota como  $J_0$ . Tan pronto como la corrosión comienza, el equilibrio es alterado y se da que  $J_a > -J_c$ .

Cuando se sumerge la pieza de cobre en el agua, el primer evento que se presenta es el paso de los iones metálicos al electrólito que está del lado de la interfase metal-electrólito. Los iones metálicos (cationes) inicialmente permanecen asociados con el sólido metálico al que tienen que dejar. Así podemos imaginar al metal como un sólido cargado negativamente, rodeado por una capa de cationes. Esta distribución no homogénea de iones que resulta de sumergir el metal en el electrólito acuoso, es conocida como la "Doble Capa", figura 1.7.

La doble capa consiste de dos partes :

- a) Una capa compacta, la capa de Helmholtz, más cercana a la superficie en la que debido a la distribución de carga, el potencial cambia linealmente con la distancia que hay a la superficie del electrodo.
- b) Una capa exterior más difusa, la capa de Gouy-Chapman, en la que el potencial cambia exponencialmente.

La constitución de la doble capa modifica de forma paralela los cambios de potencial que ocurren en el electrodo y las condiciones de equilibrio del sistema. Cuando se destruye el equilibrio, ya sea por incremento en la reacción anódica o catódica, se establece un nuevo equilibrio dinámico en el que se da un flujo de aniones y cationes en el electrólito adyacente a los electrodos para cubrir los requerimientos de intercambio de corriente de las reacciones de electrodo.

Con el ejemplo anteriormente descrito, ahora tenemos una forma alternativa para visualizar el proceso mediante el cual, el electrodo pierde su habilidad para corroerse. El potencial de corrosión de un metal está determinado por la cantidad de carga negativa (electrones) que se desarrolla sobre él cuando se coloca en un electrólito. Cuando ocurre la corrosión, los electrones producidos por el metal anódico son conducidos hacia el cátodo. La carga negativa sobre el metal se reduce y el potencial de corrosión disminuye. Así, por ejemplo, podemos imaginar que el zinc adquiere más carga negativa que el hierro cuando se sumergen en un medio acuoso, esta suposición queda confirmada al verificar sus potenciales de electrodo: encontramos que los valores son de  $-0.76\text{V}$  y  $-0.44\text{V}$  para el zinc y el hierro respectivamente (a condiciones de corriente cero). Si el zinc y el hierro sufrieran corrosión independientemente, sus potenciales de corrosión llegarían a ser menos negativos

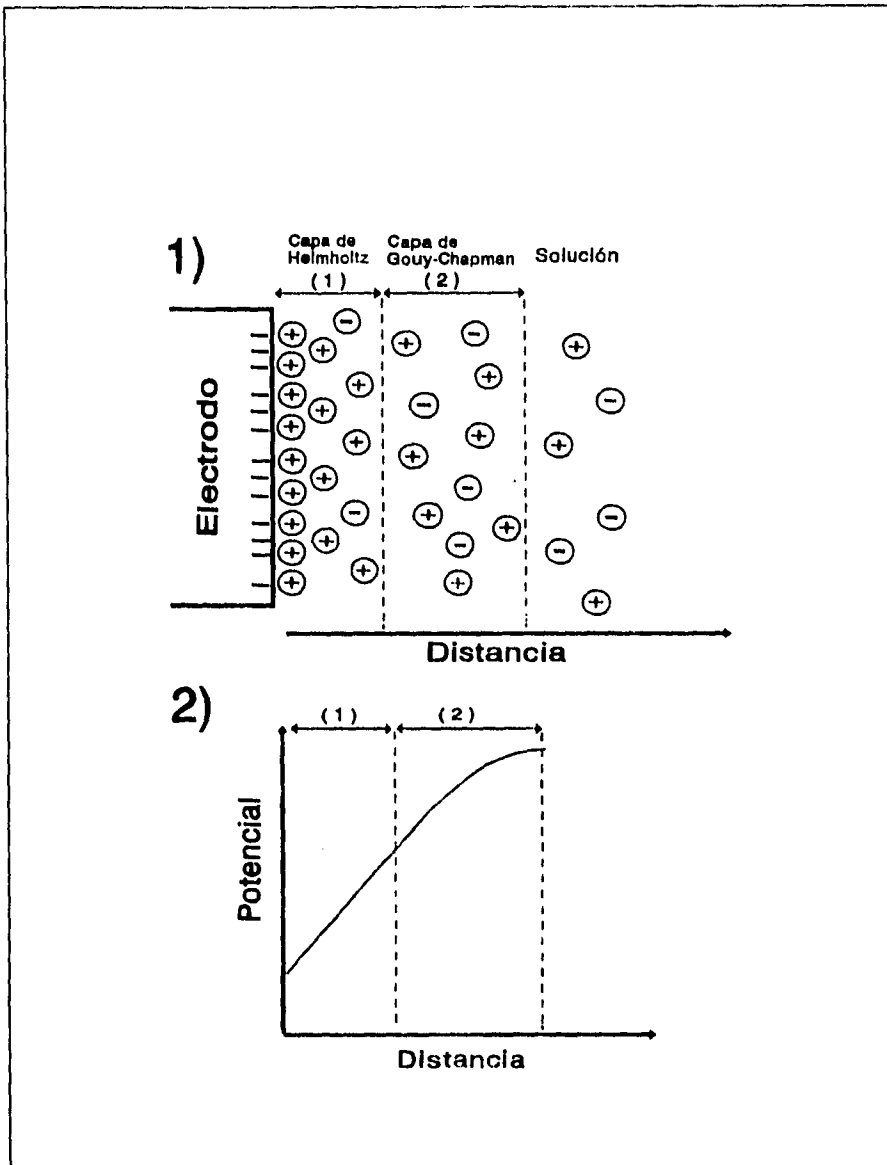


Fig. 1.7 La Doble Capa. a) Distribución de los iones como función de la distancia de un electrodo que se comporta como ánodo. b) Variación del potencial con la distancia para el modelo del inciso a.



debido a la pérdida de electrones; pero si éstos se conectaran, los electrones partirían del zinc (el cual llega a ser menos negativo) al hierro (el cual llega a ser más negativo).

A partir de la Ley de Faraday, se puede encontrar una expresión que describa la rapidez con la que se corroerá un metal, a partir del flujo de electrones que se establece en dicho proceso. La ley de Faraday establece que :

$$Q = z F M \quad \text{Ec.1.39}$$

donde  $Q$  es la carga creada por la ionización de  $M$  mol de material. Diferenciando la ecuación 1.39 con respecto al tiempo se obtiene :

$$\frac{dQ}{dt} = z F \frac{dM}{dt} \quad \text{Ec.1.40}$$

Ahora la rapidez del flujo de carga se transforma en corriente,  $I$ , y si consideramos que el paso de carga atraviesa una área unitaria de sección transversal, entonces podemos usar el término densidad de corriente,  $J$ . A la expresión  $dM/dt$  se le llama flujo de sustancia (o masa) y se denota como  $W$ . De lo anterior la ecuación 1.40 queda como :

$$J = z F W \quad \text{Ec.1.41}$$

El flux de sustancia (o masa) es otro nombre que se le da a la rapidez de corrosión por unidad de área. En la ecuación 1.41 puede observarse que los conceptos de densidad de corriente y la rapidez de corrosión son conceptos equivalentes, además de que la rapidez de corrosión puede ser determinada por mediciones de densidad de corriente. Sin embargo, en la

práctica es poco claro decir que un metal se corroe a una rapidez de  $0.003 \text{ A m}^2$ ; por ello se prefiere expresar esta rapidez de deterioro promedio por unidad de área como una profundidad promedio de corrosión sobre una área dada en un tiempo dado. Por ejemplo, una rapidez de corrosión de  $2.5 \text{ mm}$  por año significa que en un año, la superficie metálica expuesta al medio corrosivo se degradó en  $2.5 \text{ mm}$  de profundidad. Generalmente, esta unidad de medida se expresa como mmpa (en inglés mmpy) y en E.U. como mpy (mili-inches per year).

## 1.6 TÉCNICAS PARA EL CÁLCULO DE LA RAPIDEZ DE CORROSIÓN.

En las secciones precedentes se ha dado un panorama general del fenómeno de corrosión, se ha descrito el proceso por el cual se da éste, así como sus implicaciones termodinámicas y cinéticas; en la práctica, en un momento dado, lo que más interesa es el conocimiento de la rapidez de corrosión que sufren los diversos materiales en ambientes específicos. Algunos metales, según la termodinámica, tienen una tendencia muy pronunciada a reaccionar, por ejemplo el aluminio y el magnesio, sin embargo, al probarlos se encuentra que éstos reaccionan lentamente y que generalmente satisfacen los requerimientos que se necesitan en ellos al exponerlos en ambientes en que otros metales tendrían una tendencia inherente a reaccionar.

En este punto hay que hacer notar que el fenómeno de corrosión, no se produce bajo condiciones de equilibrio. Un electrodo no logra llegar al equilibrio cuando se hace fluir

una corriente desde o hacia su superficie, por lo que el potencial medido dependerá de la magnitud y la dirección de dicha corriente externa. La dirección del cambio de potencial siempre se opone a la modificación del equilibrio y por lo tanto al flujo de corriente, donde la corriente puede ser, impuesta externamente o de origen galvánico. Cuando el flujo de corriente se da en una celda galvánica, por ejemplo, el ánodo siempre adquiere un potencial más catódico y el cátodo siempre llega a ser más anódico, lo que provoca una diferencia de potencial más pequeña. La extensión del cambio de potencial causada por una corriente, desde o hacia un electrodo y medida en volts, se le llama **polarización** (también conocido como sobrepotencial y sobrevoltaje, sin embargo, el término sobrepotencial se aplica cuando se parte de una situación de equilibrio a las condiciones standard).

### 1.6.1 POLARIZACIÓN.

Como ya se mencionó, la polarización se presenta cuando un metal no se encuentra en equilibrio con una solución de sus iones y se manifiesta como una desviación del potencial libre de corrosión. El símbolo utilizado para denotarla, es la letra griega ( $\eta$ ). La polarización es un parámetro extremadamente importante para establecer la rapidez de un proceso de corrosión.

#### A. CAUSAS DE POLARIZACIÓN.

Las causas de la polarización recaen principalmente en tres diferentes categorías : por concentración, por activación y por caída óhmica (IR).

1. **Polarización por Concentración.** Por ejemplo, si se colocará una pieza de cobre como cátodo en una solución diluida de  $\text{CuSO}_4$ . El potencial  $E_1$  en ausencia de corriente externa, está dado por la ecuación de Nernst :

$$E_1 = 0.337 + 0.0592/2 \log [\text{Cu}^{2+}] \quad \text{Ec.1.42}$$

Donde,  $[\text{Cu}^{2+}]$  representa la concentración de los iones cúpricos. Cuando la corriente fluye, los iones cúpricos sufren una reacción de reducción y se depositan sobre el electrodo, por lo cual la concentración superficial de los iones cúpricos disminuye; esta nueva concentración se representa como  $[\text{Cu}^{2+}]_s$ . El potencial de electrodo,  $E_2$ , ahora se representa como :

$$E_2 = 0.337 + 0.0592/2 \log [\text{Cu}^{2+}]_s \quad \text{Ec.1.43}$$

Dado que  $[\text{Cu}^{2+}]_s$  es menor que  $[\text{Cu}^{2+}]$ , el potencial del cátodo polarizado es menos noble o más activo que en la ausencia de un potencial externo. La diferencia de potencial  $E_2 - E_1$ , conocida como "polarización por concentración", es igual a:

$$E_2 - E_1 = - \frac{0.0592}{2} \log \frac{[\text{Cu}^{2+}]}{[\text{Cu}^{2+}]_s} \quad \text{Ec.1.44}$$

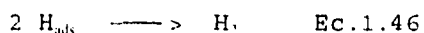
Entre más grande es la corriente externa, resulta más pequeña la concentración superficial de los iones cúpricos -  $[\text{Cu}^{2+}]_s$ , resulta más pequeño-, por lo tanto, se obtiene una polarización mayor. Cuando  $[\text{Cu}^{2+}]_s$  se aproxima a cero en la superficie del electrodo, se dice que se tiene una concentración por polarización infinita; la densidad de corriente bajo estas condiciones se le llama densidad de

corriente límite.

**2. Polarización por Activación.** La polarización por activación es causada por una reacción de electrodo lenta. Se define en otra forma, al resaltar la necesidad de cierta cantidad de energía (llamada de activación) para poder dar inicio a la reacción. El ejemplo más importante es el de la reducción del ion hidronio en el cátodo,  $H^+ \rightarrow \frac{1}{2}H_2 - e^-$ , a la correspondiente polarización se le conoce como sobrevoltaje por desprendimiento de hidrógeno (hydrogen overvoltage). En un cátodo de platino, por ejemplo, se piensa que ocurre la reacción en secuencias :



donde,  $H_{ads}$ , representan a los átomos de hidrógeno adsorbidos en la superficie del metal. A esta reacción, que es relativamente rápida, le sigue una combinación de reacciones de formación de hidrógeno molecular y de desprendimiento de las mismas mediante burbujas de gas.



Esta reacción es relativamente lenta, y su rapidez determina el valor del sobrepotencial sobre el platino.

La polarización por activación es también característica de la depositación de los iones metálicos, así como de la disolución de los metales. Los valores pueden ser grandes para los metales de transición (por ejemplo hierro, níquel y cromo), o pequeños para los metales en otras clasificaciones (por ejemplo, plata). El anión asociado con el ion metálico influye sobre los valores de polarización más que en el caso del

sobrevoltaje por desprendimiento de hidrógeno. El paso que controla la reacción no está del todo determinado, pero en algunos casos es probable que la velocidad más lenta se de por la hidratación del ion cuando éste abandona la superficie metálica, o por la deshidratación del ion hidratado cuando éste se deposita sobre la superficie. La activación por polarización,  $\eta$ , de cualquier tipo aumenta con la densidad de corriente,  $J$ , acorde con la ecuación de Tafel, la que se verá en detalle más adelante.

**3. Caída óhmica (IR).** Las medidas de polarización incluyen las llamadas caídas óhmicas de potencial, ya sea a través de una porción del electrólito que rodea al electrodo, de la capa superficial del producto de la reacción del metal, o ambas. Una caída óhmica de potencial siempre ocurre entre el electrodo de trabajo y el electrodo de referencia. Esta contribución a la polarización es equivalente al valor de  $Jr$ , donde,  $J$  es la densidad de corriente y  $r$  es igual a  $l/k$ , que representa el valor en ohms de la o las resistencias que se mencionaron anteriormente,  $l$  es la longitud de resistencia y  $k$  es su conductividad específica.

#### **B. INFLUENCIA DE LA POLARIZACIÓN SOBRE LA RAPIDEZ DE CORROSIÓN.**

La resistencia del electrólito y la polarización de los electrodos son factores que limitan la magnitud de la corriente producida por una celda galvánica. En las celdas de acción local que se forman sobre las superficies metálicas, los electrodos están muy cerca unos de otros, por lo que la resistencia del electrólito es generalmente un factor secundario comparado con un factor más importante como lo es la

polarización.

1. **Control Catódico.** Cuando la polarización sucede primordialmente en el cátodo, se dice que la rapidez de corrosión está controlada catódicamente, figura 1.8. En dicha figura se nota que el potencial de corrosión es muy parecido al potencial a circuito abierto del ánodo. Un ejemplo de este tipo de control es la exposición del zinc en ácido sulfúrico.

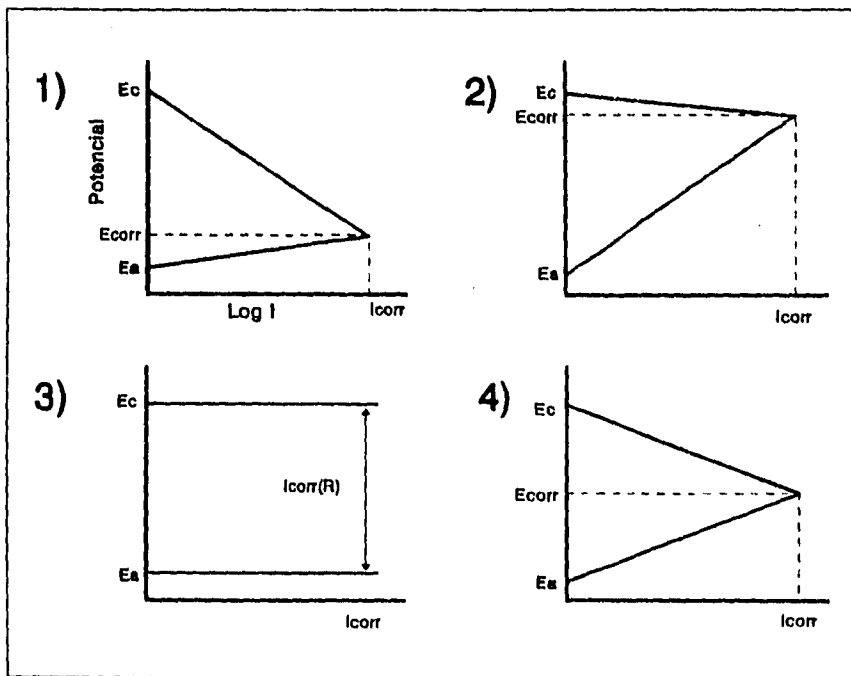


Fig. 1.8 Tipo de control de corrosión. 1) Control catódico, 2) Control anódico, 3) Control por resistencia y 4) Control mixto.

2. **Control Anódico.** Cuando la polarización ocurre principalmente en los ánodos, se dice que la reacción de corrosión está controlada anódicamente. El potencial de corrosión en este caso se encuentra muy cerca del potencial a circuito abierto del cátodo. Generalmente los metales que se corroen y que generan una capa superficial porosa presentan áreas anódicas pequeñas lo que conduce a un tipo de corrosión con control anódico. Un ejemplo práctico se presenta al sumergir plomo puro en ácido sulfúrico; en este caso se genera una película de sulfato de plomo que recubre las áreas anódicas y expone algunas impurezas catódicas (por ejemplo, cobre).

3. **Control por Resistencia.** Este tipo de control se produce cuando la resistencia del electrólito es tan alta que la corriente resultante no es suficiente para polarizar apreciablemente los ánodos o los cátodos. Un ejemplo se da con un recubrimiento aislante poroso que cubre una superficie metálica. La corriente de corrosión es controlada por la caída óhmica  $IR$  a través del electrólito en los poros del recubrimiento.

4. **Control Mixto.** Es común que la polarización ocurra en algún grado en las áreas anódicas y catódicas; a esta situación se le conoce como control mixto.

### **1.6.2 CÁLCULO DE LA RAPIDEZ DE CORROSIÓN A PARTIR DE DATOS DE POLARIZACIÓN.**

En la sección 1.5 se vió que la rapidez de corrosión está directamente relacionada con la densidad de corriente y que la rapidez de corrosión se puede expresar como :



$$\text{rapidez} = k_{\text{corr}} [\text{reactivos}] \quad \text{Ec.1.47}$$

donde la constante de rapidez,  $k_{\text{corr}}$ , se expresa como :

$$k_{\text{corr}} = A \exp ( -\Delta G^{\#}/RT ) \quad \text{Ec.1.48}$$

A es el factor preexponencial de la Ecuación de Arrhenius. De esas dos ecuaciones vemos que :

$$\text{rapidez} = A \exp ( -\Delta G/RT ) [\text{reactivos}] \quad \text{Ec.1.49}$$

En equilibrio, la rapidez de la reacción anódica es  $J_a$ , y es igual a la rapidez de la reacción catódica,  $J_c$  (recordemos que  $J_o = J_a = -J_c$ ). Generalmente, es posible considerar que la concentración de los reactivos (por ejemplo la del metal en la reacción anódica) es constante, y por lo tanto, podemos incorporarla dentro de una nueva constante,  $A_o$ . Así, podemos considerar que la rapidez de la reacción anódica viene dada por la ecuación :

$$J_a \text{ (en el equilibrio)} = J_o = A_o \exp ( -\Delta G^{\#}/RT ) \quad \text{Ec.1.50}$$

Donde  $\Delta G^{\#}$  es la energía de activación de la reacción anódica. Cuando la reacción anódica es más rápida que la reacción inversa ( $J_a > -J_c$ ), ocurre un proceso global de corrosión, el equilibrio se altera y la energía libre del metal y de sus iones quedan en diferentes niveles, como se muestra en la figura 1.6 (a).

La desviación del potencial de reposo, la polarización, es la combinación de una polarización anódica sobre el metal y la polarización catódica del ambiente. Si comparamos las figuras 1.6 (a) y (b), apreciamos que la energía libre del metal

aumenta mientras que la del ambiente decrece. Estas desviaciones de potencial del valor de reposo pueden ser o no iguales; por el momento es útil considerar valores diferentes. Los cambios se muestran en la figura 1.9.

Si la polarización total es  $\eta$ , podemos definir a la polarización anódica como  $\beta\eta$  y la polarización catódica como  $(1-\beta)\eta$ , donde  $\beta$  es el factor de simetría que relaciona las distancias de la doble capa al pináculo de la barrera energética y cuyo valor se encuentra entre cero y uno. En la figura 1.9 se ve que las polarizaciones han sido convertidas a energías mediante el factor,  $zF$ , como en la ecuación de Faraday. Esto nos permite determinar una nueva forma para la energía de activación de la reacción anódica, la cual queda expresada como  $(\Delta G^\# - \beta\eta zF)$ ; en ella vemos que el nivel de energía del metal se incrementa y la energía de activación disminuye. Así podemos reescribir la ecuación 1.50 como :

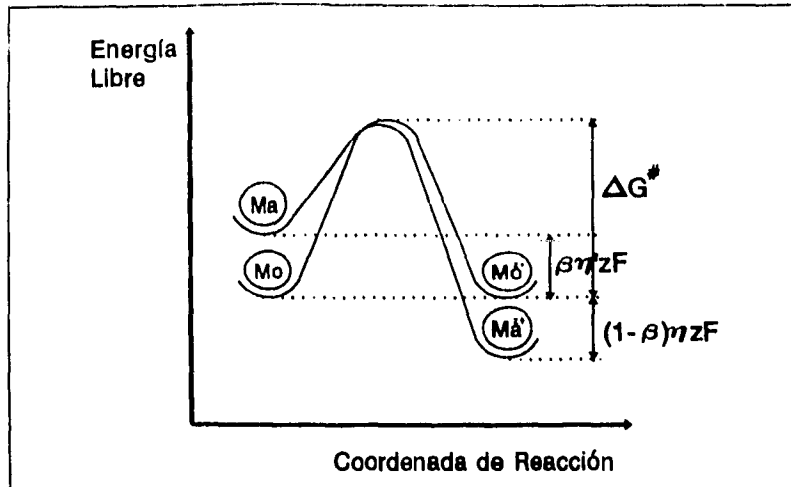
$$J_a = A_0 \exp ( - (\Delta G^\# - \beta\eta zF) / RT ) \quad \text{Ec.1.51}$$

$$J_c = A_0 \exp ( -\Delta G^\# / RT ) \exp ( \beta\eta zF / RT ) \quad \text{Ec.1.52}$$

Similarmente, la energía de activación de los cationes  $M^{z+}$  que se reducen a su forma metálica,  $M$ , durante la reacción catódica, se incrementa en una cantidad  $(1-\beta)\eta zF$ .

Continuando, únicamente con la reacción anódica por el momento; sustituyendo la ecuación 1.50 en la 1.52, tenemos :

$$J_a = J_c \exp ( \beta\eta zF / RT ) \quad \text{Ec.1.53}$$



**Fig. 1.9** Diagrama de energía para un ánodo en equilibrio (curva  $Mo/Mo'^+$ ) y diagrama para una polarización por activación anódica de  $\eta$  (curva  $Ma/Ma^{2+}$ ).

Si hacemos  $A' = \beta zF/RT$  se tendría

$$J_a = J_o \exp ( A' \eta ) \quad \text{Ec.1.54}$$

Tomando logaritmos en ambos lados :

$$\ln J_a = \ln J_o + A' \eta \quad \text{Ec.1.55}$$

Y reorganizando la ecuación 1.55

$$\ln (J_a/J_o) = A' \eta \quad \text{Ec.1.56}$$

Convirtiendo a logaritmo base decimal y ordenando la ecuación 1.56

$$\eta = (2.303/A') \log (J_a/J_o) \quad \text{Ec.1.57}$$

Agrupando los términos constantes dentro de a, encontramos que :

$$\eta_a = a \log (J_a/J_a) \quad \text{Ec.1.58}$$

donde

$$a = 2.303 RT/\beta zF \quad \text{Ec.1.59}$$

La ecuación 1.58 , si se recuerda, se desarrolló a partir del proceso de polarización anódica, de allí el subíndice "a"; de manera similar para el proceso de polarización catódica se utiliza el subíndice "c".

Si se escribe la ecuación 1.58 en una forma más general queda:

$$\eta = b \log J \quad \text{Ec.1.60}$$

Donde b puede ser la pendiente de Tafel anódica o catódica y J es la densidad de corriente medida. Esta última ecuación se conoce como la ecuación de Tafel y es un caso particular de la ecuación general de Butler-Volmer.

La ecuación de Butler-Volmer, muestra la variación de la densidad de corriente a través de la interfase metal-solución con la polarización,  $\eta$ , aplicada externamente al sistema.

$$J = J_0[\exp(\beta \eta zF/RT) - \exp(-(1-\beta)\eta zF/RT)] \quad \text{Ec.1.61}$$

Como se ve, esta ecuación consta de dos términos, el primero contempla la contribución del proceso anódico y el segundo, la contribución del proceso catódico.

**A. APROXIMACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BUTLER-VOLMER  
A ALTO CAMPO.**

Como ya se mencionó, la ecuación 1.61 tiene dos términos. Uno representa la densidad de corriente de oxidación :

$$J = J_0 \exp ( \beta \eta z F / RT ) \quad \text{Ec.1.62}$$

y el otro representa la densidad de corriente de reducción:

$$J = J_0 \exp [ -(1-\beta) \eta z F / RT ] \quad \text{Ec.1.63}$$

Si la polarización  $\eta$  se hace lo suficientemente grande, digamos mayor a 0.10V, hacia la parte catódica, la reacción de oxidación se hace despreciable. En estas condiciones la ecuación 1.61 se reduce a :

$$J = J_0 \exp [ -(1-\beta) \eta z F / RT ] \quad \text{Ec.1.64}$$

Tomando logaritmos en la ecuación 1.64, tenemos :

$$\ln J = \ln J_0 - [ (1-\beta) \eta z F / RT ] \quad \text{Ec.1.65}$$

despejando  $\eta$  de 1.65 y cambiando a logaritmos base decimal,

$$\eta_c = - c \log (J_c / J_0) \quad \text{Ec.1.66}$$

donde

$$c = 2.303 RT / (1-\beta) z F \quad \text{Ec.1.67}$$

De forma similar para el proceso de polarización anódica se obtiene :

$$\eta_a = a \log (J_a/J_0) \quad \text{Ec.1.68}$$

donde

$$a = 2.303 RT/\beta zF \quad \text{Ec.1.69}$$

Como podemos darnos cuenta, la aproximación a "alto campo" de la ecuación de Butler-Volmer nos conduce a las **Ecuaciones de Tafel**. Las ecuaciones de Tafel muestran una relación lineal de la polarización con el logaritmo de la densidad de corriente, figura 1.10, a y c son las pendientes de Tafel anódica y catódica, respectivamente, y están representadas en la misma figura. Las pendientes de Tafel dan pauta para conocer los parámetros cinéticos  $\beta$ ,  $J_0$  y  $E_0$  de la reacción de transferencia de carga.

#### B. APROXIMACIÓN DE LA ECUACIÓN DE BUTLER-VOLMER A BAJO CAMPO.

Si la polarización  $\eta$  es pequeña, digamos menor a 0.010V, entonces la ecuación 1.61 se transforma :

$$J = J_0 [1 + (\beta \eta zF/RT) - 1 + ((1-\beta) \eta zF/RT)] \quad \text{Ec.1.70}$$

$$J = J_0 \eta zF/RT \quad \text{Ec.1.71}$$

La ecuación 1.71 puede expresarse así :

$$\frac{\eta}{J} = \frac{RT}{J_0 zF} \quad \text{Ec.1.72}$$

El término  $\eta/J$  corresponde a la resistencia de la interfase a la transferencia del electrón. Un valor grande

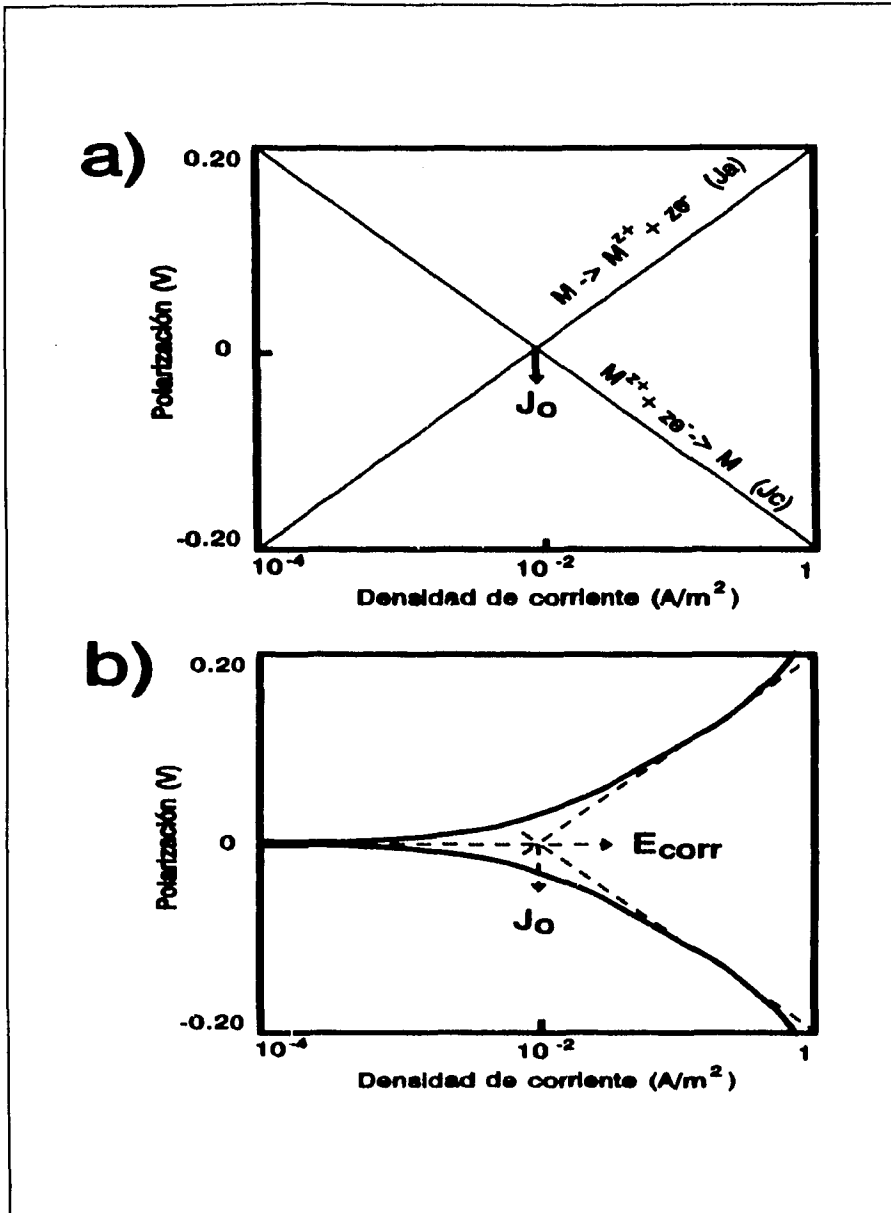


Fig. 1.10 Diagramas de Tafel. a) Diagrama teórico y b) Una idealización de un diagrama de Tafel experimental.

de  $J_0$ , significa una resistencia de transferencia rápida. La ecuación de Butler-Volmer linealizada, ecuación 1.72, enfatiza que el potencial que produce la corriente en la reacción electroquímica, es la polarización ejercida mediante una fuente externa de poder.

El término  $\eta/J$ , también se puede expresar como el recíproco de la derivada de  $J$  respecto a  $\eta$  cuando  $\eta$  tiende a cero. Esto equivale a encontrar la pendiente de la tangente a la curva dada por la ecuación 1.61 en las cercanías al potencial de corrosión, está dado por :

$$\frac{d\eta}{dJ_{\eta \rightarrow 0}} = \frac{\eta}{\Delta J} = \frac{ac}{2.303J_0(a+c)} = RP \quad \text{Ec.1.73}$$

donde,  $a$  y  $c$  son las pendientes de Tafel anódica y catódica respectivamente,  $J_0$  es la densidad de corriente de corrosión y  $RP$  tiene unidades de resistencia eléctrica por lo que se le conoce como **Resistencia a la Polarización**.

#### D. OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE POLARIZACIÓN.

Para obtener los datos de polarización y poder calcular la rapidez de corrosión de los diferentes metales, generalmente se utilizan los siguientes instrumentos :

1. **Celda de Corrosión.** Esta celda también recibe el nombre de "celda de tres electrodos" y es el instrumento de laboratorio más común para investigar cuantitativamente las propiedades corrosivas de los materiales. Es una versión más refinada de la celda galvánica. Un esquema típico de dicha celda se



muestra en la figura 1.11. Esta puede ser usada en diferentes tipos de experimentos de corrosión. Veamos de que partes dispone :

*Electrodo de Trabajo.* Este es el nombre que recibe el electrodo que está siendo investigado. Se usa el término electrodo de trabajo en lugar de ánodo por que las investigaciones no se limitan únicamente a examinar el comportamiento anódico; en un momento dado se puede estudiar su conducta catódica. Se construyen electrodos de trabajo muy prácticos, encapsulando una muestra del espécimen (así como su conexión eléctrica) mediante una resina resistente al medio corrosivo.

*Electrodo auxiliar o contraelectrodo.* Así se le denomina al electrodo que se coloca, específicamente, para llevar la corriente a través del circuito creado dentro de la celda. Usualmente se utiliza una barra de carbón, pero se puede utilizar cualquier material que no introduzca iones contaminantes en el electrólito. Otros contraelectrodos hechos de platino y oro se utilizan cuando el espacio de la celda es apremiante, ya que estos metales tienen gran ductilidad.

*Electrodo de referencia.* Este electrodo está presente para proveer un punto estable de referencia en la medición del potencial del electrodo de trabajo. Este no puede llevar carga al sistema, más que la únicamente necesaria para generar su potencial. Al igual que el contraelectrodo, éste no debe participar en las reacciones de celda. El electrodo más popular en los trabajos de laboratorio, es el electrodo saturado de calomel (ESC).

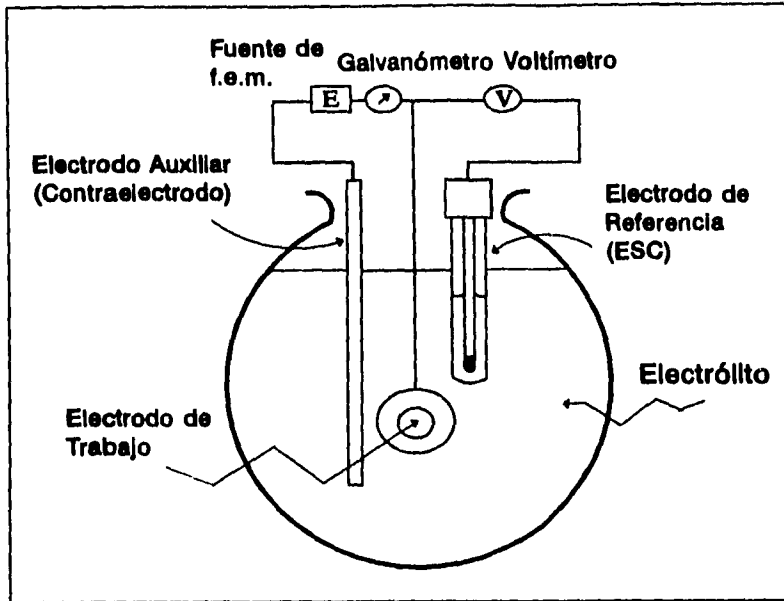


Fig. 1.11 Celda de corrosión.

Circuito externo. Este puede variar considerablemente, pero los componentes esenciales son los siguientes :

- a) Un aparato capaz de medir la corriente en miliampers o, preferentemente, en microampers.
- b) Un aparato para medir potenciales. Es importante que no se imparta corriente durante la medición del potencial, sino ésta se verá alterada.
- c) Una fuente de poder para inducir las reacciones deseadas sobre el electrodo de trabajo. El aparato más utilizado es el potencióstato que se describe adelante.

La celda de corrosión puede contar con otros instrumentos, tales como termómetros, electrodos para medir pH, así como boquillas para el burbujeo de gases.

2. **Potenciostato.** Este instrumento mantiene automáticamente (con el uso opcional de una microcomputadora) el potencial deseado entre el electrodo de trabajo y el de referencia, esto se logra mediante el paso de la cantidad apropiada de corriente entre el electrodo de trabajo y el contraelectrodo. Un circuito eléctrico típico para el potenciostato contempla una fuente de poder, una resistencia variable, un amperímetro y un potenciómetro, el esquema de este arreglo se muestra en la figura 1.12.

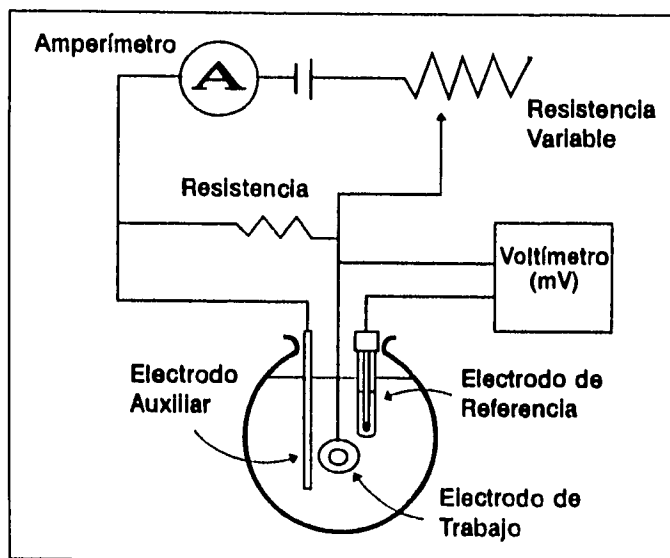


Fig. 1.12 Arreglo típico de un potenciostato.

Para asegurarse que el potencial a través de la celda sea constante, se conecta una resistencia exterior mucho menor a la que se tiene entre los electrodos en paralelo. Bajo dichas condiciones, los cambios en la resistencia de la celda no se verán afectados por los cambios de potencial debido a los componentes de la resistencia exterior. La resistencia de la celda,  $r$ , está dada por :

$$r = r_a + r_c + r_e \quad \text{Ec.1.74}$$

Donde,  $r_a$ ,  $r_c$  y  $r_e$  son las resistencias del proceso anódico, del proceso catódico y del electrólito, respectivamente. Las resistencias de electrodo,  $r_a$  y  $r_c$ , variarán con la corriente a través de la celda de manera directa con las características de polarización de las reacciones. En las investigaciones potencioestáticas es necesario medir la corriente a través de  $r_e$  como una función de la diferencia de potencial a través de la misma. Si la suma de resistencias en serie del circuito exterior se expresa como,  $r_{ext}$ , entonces la resistencia total del circuito íntegro,  $r_{tot}$ , excluyendo  $r_a$ , es :

$$r_{tot} = r_{ext} + r_c + r_e \quad \text{Ec.1.75}$$

Dado que la corriente a través de  $r_{tot}$  afectará a la diferencia de potencial a través de  $r_a$ ,  $r_{tot}$  debe mantenerse lo más pequeña posible, para así, minimizar la interferencia con la medición de  $r_a$ .

**3. El Método.** Generalmente, en la obtención de los datos de polarización, lo primero que se mide es el potencial de corrosión,  $E_{cs}$ , en condiciones de circuito abierto,  $J_{apli}$  igual a cero. Después el electrodo se polariza, desde potenciales catódicos hasta potenciales anódicos, esto con el fin de no

afectar la posible película de productos de corrosión depositados sobre el electrodo.

La polarización puede realizarse potencioestáticamente, esto significa que se aplica un potencial constante al electrodo de trabajo y se registra la variación de la corriente con el tiempo; o potenciodinámicamente, en la que se varia el potencial uniformemente con respecto al tiempo, ya sea en forma de escalón o a velocidad constante. Finalmente se obtienen los diagramas  $E/\log(J)$  para un análisis posterior.

**CAPÍTULO 2**  
**FUNDAMENTOS DE MICROBIOLOGÍA**

---

La Microbiología es el estudio de los microorganismos, es decir seres organizados sólo visibles al microscopio. Este estudio comprende la constitución morfo-fisiológica, culturales y bioquímicas de los microorganismos. Esto incluye el estudio de su distribución en la naturaleza y la relación entre ellos mismos y otros seres. Sin embargo, la caracterización biológica total de los microorganismos requiere una comprensión profunda de los nichos ecológicos y la historia evolutiva, de los que falta mucho por aprender, incluso de los microorganismos más estudiados.

En los sistemas tradicionales de clasificación, los microorganismos son asignados al reino vegetal o animal. En 1886, E. Haeckel propuso que los microorganismos se colocaran en un tercer reino separado, el de los *Protistas*, que comprendiera los organismos que en muchos aspectos son intermedios entre vegetales y animales, él definió que el reino protista incluía algas, protozoarios, hongos y bacterias.

Otros biólogos (Copeland, 1956) han sugerido establecer un cuarto reino, el *Monera*, para abarcar a las bacterias y algas verdeazules, que tiene muchas características comunes entre sí como ausencia de membrana nuclear. Las bacterias y algas verdeazules se denominan *procariontes*, para indicar que no poseen membrana nuclear sino un solo cromosoma desnudo, además carecen de organelos subcelulares ligados a membranas (como mitocondrias y cloroplastos). Las plantas y animales son *eucariontes*, caracterizados por verdaderos núcleos delimitados por una membrana celular.

Los virus no son células, no son procariontes ni eucariontes. Una partícula viral consiste en una molécula de ácido nucleico, ya sea DNA o RNA, cubierta por una capa de proteína o cápside,

que sirve sólo para proteger el ácido nucleico y para facilitar la adherencia y penetración a la célula huésped.

## 2.1 ESTRUCTURA CELULAR.

La división del mundo vivo en las ramas procarionte y eucarionte, se debe en mucho a los resultados obtenidos al examinar las células con el microscopio electrónico, el cual, reveló por primera vez el contenido interno de las pequeñas células bacterianas. A continuación se mencionan muy brevemente los componentes de las células procariontes.

**APÉNDICES SUPERFICIALES.** Algunos microorganismos tienen estructuras que sobresalen de la superficie celular, los más frecuentes son los cilios, los flagelos y los *pilis*. La función de los dos primeros es mover el líquido en relación con el punto de inserción del organelo y si el microorganismo se puede mover, el resultado es la locomoción del organismo; si, por el contrario, el microorganismo es incapaz de moverse, servirán para renovar el líquido que está sobre la superficie del mismo.

**CÁPSULAS Y CAPAS MUCOSAS.** Muchos microorganismos están rodeados por unas capas de diversos materiales al exterior de la rígida pared celular, estas capas son las cápsulas y las capas mucosas.

**PARED CELULAR.** Es el principal componente estructural de la mayor parte de los microorganismos, con excepción de los micoplasmas y de ciertos protozoos. La pared celular puede ser rígida o semirígida, es una envoltura que rodea al protoplasto del microorganismo y confiere a la célula



microbiana su forma característica, por ejemplo: bacilo o coco.

Las bacterias se clasifican como Grampositivas o Gramnegativas según su respuesta al procedimiento de la tinción de Gram (que se describe más adelante). Los materiales de la matriz de las paredes de las bacterias Grampositivas son principalmente polisacáridos. Las paredes de las bacterias Gramnegativas tienen una estructura pluriestratificada. La capa más interna está compuesta de glucopéptidos. Sobre ésta hay una capa más gruesa compuesta de moléculas de lipoproteína que está a su vez cubierta por una capa de forfolípidos y finalmente una capa de lipopolisacáridos (LPS).

**MEMBRANA CITOPLASMICA.** La estructura y organelos vitales de un microorganismo se hallan localizados en el interior del citoplasma, que está limitado por una membrana que suele denominarse membrana citoplasmática o en ocasiones con el nombre antiguo de membrana plasmática.

La membrana citoplasmática tiene cuatro funciones principales en un microorganismo: permeabilidad selectiva; actuar como organelo que concentra los nutrientes en el interior de las células, excretar enzimas; actuar como organelo donde se realiza la biosíntesis de determinados constituyentes celulares, localizar las enzimas del transporte de electrones y de funciones energéticas que realizaría la mitocondria en la célula eucarionte (cadena respiratoria).

Los mesosomas son derivaciones de invaginaciones de la membrana plasmática que parece participar en actividades como la respiración y división celular.

**NÚCLEO.** En las bacterias no existe un núcleo verdadero, sino una zona nuclear que consta de una molécula de DNA, la que tiene la información genética de organismo codificada en él.

**CITOPLASMA.** En el citoplasma de las células procariontes las únicas membranas citoplásmicas presentes son los mesosomas, que son simples derivaciones de invaginaciones de la membrana plasmática, a diferencia de las células eucariontes, que contienen una gran diversidad de estructuras membranosas.

**RIBOSOMAS.** A diferencia del DNA, el RNA no está confinado en una región u organelo, sino que se encuentra ampliamente distribuido. Los ribosomas son los sitios de síntesis proteica, por lo que se encuentra combinado con proteínas en forma de pequeñas partículas.

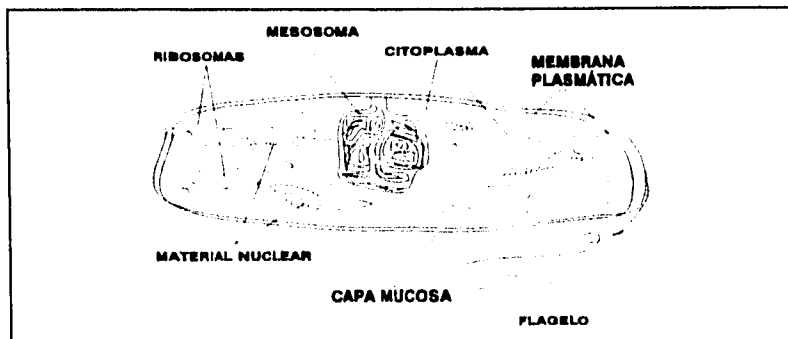


Fig. 2.1 Estructura celular.

## **2.2 CRECIMIENTO Y SUPERVIVENCIA DE LOS MICROORGANISMOS.**

La población de microorganismos en la biosfera está constituida por representantes de diferentes géneros. Otros microorganismos, caracterizados a menudo como organismos unicelulares en el laboratorio, forman colonias cohesivas en el ambiente natural. Cabe recordar que muchos microorganismos compiten en el ambiente natural mientras están en tensión nutricional, circunstancia que puede producir un estado fisiológico bastante distinto al observado en el laboratorio. Más aún debe reconocerse que cualquier nicho microbiano vacante del ambiente se llenará con prontitud.

### **2.2.1 CULTIVO DE MICROORGANISMOS.**

Se llama cultivo al proceso de propagar microorganismos brindándoles las condiciones nutricionales y ambientales adecuadas. Los microorganismos en crecimiento están haciendo réplicas de sí mismos, y requieren los elementos que se encuentran en su composición química. Los nutrimentos deben brindarles estos elementos en una forma accesible desde el punto de vista metabólico. Además, estos microorganismos requieren energía metabólica con objeto de sintetizar macromoléculas y conservar los gradientes químicos esenciales a través de sus membranas. Los factores que se deben regular durante el crecimiento son nutrientes, pH, temperatura, aireación, concentración de sales y potencia iónica del medio.

### 2.2.2 CRECIMIENTO.

Crecimiento es el incremento ordenado en todos los componentes de un microorganismo. Por lo tanto, el aumento de tamaño que resulta cuando una célula capta agua o deposita lípidos o polisacáridos, no es un crecimiento verdadero. La multiplicación celular es una consecuencia del crecimiento; en microorganismos unicelulares, la multiplicación conduce a un aumento en el número de individuos dando lugar a una población o cultivo.

**MEDICIÓN DE CRECIMIENTO.** El crecimiento microbiano puede medirse en términos de concentración celular (número de células viables por unidad de volumen de cultivo) o de concentración de la biomasa (peso seco o húmedo de células por unidad de volumen de cultivo). Estos dos parámetros no siempre son equivalentes, debido a que el promedio de peso seco de la célula varía en las distintas etapas de la historia del cultivo.

**CONCENTRACIÓN CELULAR.** La cuenta de células viables suele considerarse como la medida del crecimiento microbiano o del crecimiento de la población. Sin embargo, para muchas finalidades es la turbiedad del cultivo medida de manera fotoeléctrica, la que se relaciona con la cuenta de microorganismos en forma de curva estándar (Apéndice 3B). A veces es posible efectuar una estimación visual aproximada. Cuando se emplean mediciones turbidimétricas, debe recordarse que puede variar la correlación entre turbiedad y cuenta viable durante el crecimiento y la muerte de un cultivo; las células pueden perder viabilidad sin que ocurra pérdida de la turbiedad del cultivo.

**CURVA DE CRECIMIENTO.** Si se determina periódicamente el número de células viables por mililitro, obtenidas del inóculo de un cultivo que previamente ha crecido hasta la saturación y se traza una gráfica, generalmente se obtiene una curva como la que se muestra en la figura 2.2.

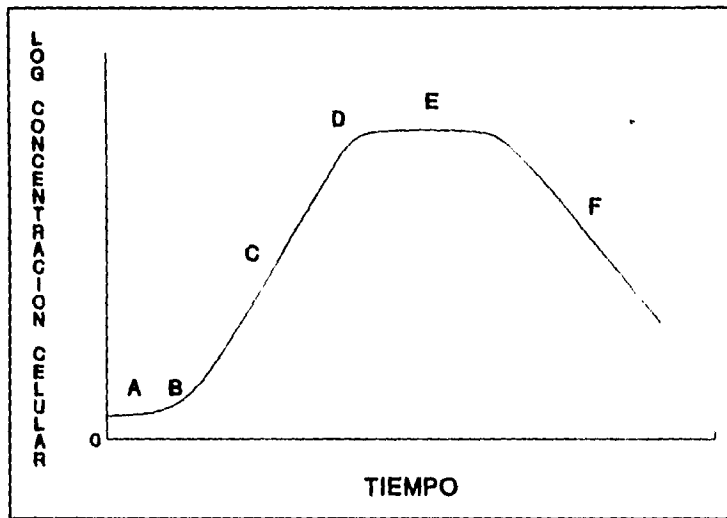


Fig. 2.2 Curva de crecimiento.

En la curva de crecimiento podemos distinguir cuatro etapas:

1. **Fase de rezago (A).** Representa un período durante el cual las células se adaptan a su nuevo ambiente. En esta etapa se forman enzimas y metabolitos intermediarios que se acumulan hasta alcanzar concentraciones que permiten que el crecimiento se reinicie.

Si las células son transferidas a un medio de composición diferente, con frecuencia ocurre que son incapaces de crecer en el nuevo medio, o lo hacen muy lentamente. En tales casos, la fase de rezago o adaptación, representa el período de formación de las enzimas necesarias para utilizar los nuevos nutrientes, esto hace posible que se realice la multiplicación suficiente que se traduce en un aumento del número de células.

**2. Fase exponencial (C).** Durante la fase exponencial (de la que se describirán los aspectos matemáticos más adelante), las células se encuentran en una fase sostenida. En esta etapa se tienen las condiciones favorables para la actividad enzimática. El material celular aumenta hasta que sucede una de dos cosas: que uno o más nutrimentos del medio se agoten, o que se acumulen productos tóxicos que inhiban el crecimiento. Para los microorganismos aerobios, el nutrimento que se vuelve limitante generalmente es el oxígeno: cuando la concentración celular pasa de aproximadamente  $1 \times 10^7$  por ml (en el caso de las bacterias), la velocidad de crecimiento decrece a menos que se incremente el ingreso de oxígeno al medio, o se haga burbujear aire al mismo. Cuando la concentración bacteriana alcanza 4 a  $5 \times 10^9$  por ml, la velocidad de difusión del oxígeno no puede satisfacer las demandas aun en medio aireado, y el crecimiento disminuye progresivamente.

Las células pueden mantenerse en fase exponencial transfiriéndolas periódicamente a un medio fresco de composición idéntica cuando están aún creciendo exponencialmente, lo que se conoce como medio continuo.

**3. Fase estacionara máxima (E).** Finalmente, el agotamiento de

los nutrimentos o la acumulación de productos tóxicos hace que el crecimiento finalice por completo. Sin embargo, en la mayoría de los casos, hay recambio celular en la fase estacionaria: hay una pérdida lenta de células por muerte, lo cual es compensado exactamente por la formación de nuevas células, a través del crecimiento por división celular. Cuando fenómeno se presenta, el número total de células aumenta lentamente, aunque la cuenta de células viables permanece constante.

**4. Fase de declinación (Fase de muerte, F).** Después de un tiempo en fase estacionaria, que varía con el microorganismo y las condiciones de cultivo, la velocidad de mortalidad aumenta hasta alcanzar un nivel sostenido. Frecuentemente, después de la mayoría de las células han muerto, la velocidad de mortalidad disminuye en forma drástica, de tal manera que un pequeño número de sobrevivientes pueden persistir en el cultivo por meses o un año. En algunos casos esta persistencia puede indicar recambio celular, creciendo unas cuantas células a expensas de los nutrimentos liberados por la lisis celular.

### **2.2.3 PARÁMETROS DE CRECIMIENTO.**

Para determinar cuantitativamente el efecto de variaciones de parámetros significativos del crecimiento bacteriano se deben considerar el crecimiento total y la velocidad de crecimiento exponencial.

Un cultivo detiene su crecimiento cuando sucede alguna de las tres siguientes variaciones: (1) se agotan uno o más nutrientes; (2) se acumulan productos tóxicos, o (3) se establece un equilibrio iónico desfavorable (por ejemplo, pH inadecuado).

Si el crecimiento total (G) es limitado por el agotamiento de un nutrimento, entonces  $G=KC$ , en donde K es una constante y C es la concentración inicial de nutrimento limitante.

Si algún nutrimento se encuentra inicialmente en una concentración suficientemente baja, los metabolitos intermediarios se formarán a una velocidad limitada y la velocidad global de crecimiento será una función de la concentración del nutrimento limitante.

## **2.2.4 REQUERIMIENTOS PARA EL CRECIMIENTO MICROBIANO.**

La mayor parte del peso seco de los microorganismos consiste en materia orgánica que contiene los elementos carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno, fósforo y azufre. Además se requieren iones inorgánicos como potasio, sodio, hierro, magnesio, calcio y cloruro para facilitar la catálisis enzimática y conservar los gradientes químicos a través de la membrana celular.

La membrana citoplásmica debe conservarse uniforme, debido a que es el único medio que tienen las bacterias de defensa contra los cambios del medio externo que pueden alterar tanto a su composición interna como su capacidad de crecimiento. La energía necesaria para construir y mantener su membrana y pared



celular proviene de la formación y destrucción de enlaces fosfato a través de las vías metabólicas y la cadena de transporte de electrones (fosforilación oxidativa) y el gradiente electroquímico que existe entre el medio interno y externo bacterianos.

### 2.2.5 NUTRICIÓN.

Son pocos los organismos que pueden utilizar directamente la energía de la radiación solar y que utilizan sales minerales para asegurar su desarrollo, estos organismos son llamados **autótrofos**, por otro lado a los organismos que necesitan de compuestos orgánicos para su desarrollo se les llama **heterótrofos**. Hay otros factores necesarios para el desarrollo de los organismos, tanto en el terreno de los elementos para el crecimiento, como en el de las fuentes de energía. A continuación se describe la clasificación de microorganismos atendiendo a su metabolismo energético:

1. **Los organismos fotolitótrofos.** Utilizan sustancias inorgánicas oxidables como donadores de electrones (hidrógeno molecular y compuestos reducidos de azufre) con la ayuda de energía radiante. Estos organismos son autótrofos, la fuente de carbono son compuestos inorgánicos tales como  $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}_2$ . Podemos contar a las sulfobacterias verdes y púrpuras, así como a las algas azules en este grupo.
2. **Los organismos fotoorganótrofos.** Utilizan substratos orgánicos oxidables como donadores de electrones con ayuda de la energía radiante. El  $\text{CO}_2$  constituye para ellas una fuente

de obtención de carbono y se desarrollan en medios inorgánicos.

**3. Los organismos quimiolitótrofos.** Obtiene su energía de reacciones de óxido-reducción y utilizan substratos inorgánicos como donadores de electrones (compuestos reducidos de azufre, hierro, manganeso, nitrógeno e hidrógeno gaseoso). Éste es el caso de las bacterias sulfooxidantes, de las nitrificantes, de las ferrobacterias y sulfobacterias. En su gran mayoría, se trata de bacterias autótrofas y utilizan el gas carbónico como fuente de obtención de carbono.

**4. Los organismos quimiorganótrofos.** Obtienen su energía a partir de fenómenos de óxido-reducción. Los substratos orgánicos (alcohol etílico, ácidos láctico, succínico o málico) son los donadores de electrones, se trata de organismos heterótrofos.

	AUTÓTROFOS		HETERÓTROFOS	
	FOTOLITÓTROFO	QUIMILITÓTROFO	FOTOORGANOTÓTROFOS	QUIMIORGANOTÓTROFOS
<b>ENERGÍA</b>	Radiación Luz	Oxido- reducción	Radiación Luz	Oxido- reducción
<b>DONADORES DE ELECTRONES</b>	Sustancias minerales oxidables		Substratos orgánicos oxidables	

Tabla 2.1 Clasificación de los organismos.

**FUENTES DE ENERGÍA METABÓLICA** . Para que se produzcan el crecimiento y la actividad de todos los seres vivos se requiere la existencia de una fuente de energía utilizable. Los tres mecanismos principales para generar energía metabólica son fermentación, respiración y fotosíntesis. Para poder crecer, el microorganismo debe emplear por lo menos uno de estos mecanismos. Nos referiremos a los dos primeros.

a) **Fermentación.** La fermentación se caracteriza por fosforilación de sustrato, proceso enzimático en el que un intermediario metabólico fosforilado dona directamente un enlace de pirofosfato ADP (difosfato de adenosina). Los intermediarios fosforilados se forman por redistribución metabólica de un sustrato fermentable como glucosa, lactosa o arginina. Como las fermentaciones no se acompañan de ningún cambio en el estado global de oxidoreducción del sustrato fermentable, la composición elemental de los productos de la fermentación debe ser idéntica a la de los sustratos. Por ejemplo la fermentación de la glucosa, produce una ganancia neta de dos enlaces pirofosfato en el trifosfato de adenosina y dos moléculas de ácido láctico.

b) **Respiración.** La respiración es análoga al acoplamiento de un proceso dependiente de energía, con la descarga de una bacteria. La reducción química de un oxidante (aceptor de electrones) por una serie específica de portadores de electrones en la membrana citoplasmática establece la fuerza motriz prótica a través de la membrana bacteriana. El agente reductor (donador de electrones) puede ser orgánico o inorgánico; por ejemplo el ácido láctico sirve como reductor a algunos microorganismos, y el gas hidrógeno es un reductor para otros. A menudo se emplea como oxidante el oxígeno gaseoso ( $O_2$ ); pero algunos microorganismos emplean oxidantes

alternativos como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).

**FUENTES DE CARBONO.** Los organismos quimiolitótrofos, emplean un sustrato inorgánico, como el hidrógeno o el tiosulfato, como reductor y el dióxido como fuente de carbono. Los heterótrofos requieren carbono orgánico para crecer, y éste debe encontrarse en una forma que pueda asimilarse. Por ejemplo, el naftaleno brinda todo el carbono y la energía que se requieren en el crecimiento respiratorio heterótrofo, pero son muy pocos los microorganismos que poseen las enzimas necesarias para asimilar la sustancia. Por otra parte la glucosa puede apoyar el crecimiento fermentativo o respiratorio de muchos microorganismos. Es importante que se proporcionen los nutrientes que son necesarios para el crecimiento en las concentraciones adecuadas para la cepa microbiana que se está desarrollando; las concentraciones que pueden favorecer a un microorganismo pueden inhibir el crecimiento de otro.

Probablemente todos los microorganismos pueden utilizar o fijar el más sencillo de los compuestos de carbono, el dióxido de carbono, sin embargo los hidratos de carbono están entre las fuentes de carbono más frecuentemente asequibles a los microorganismos, los monosacáridos, especialmente hexosas, son muy utilizados. Algunos de los medios tradicionales en los laboratorios microbiológicos, como el caldo nutritivo proporcionan aminoácidos como fuente principal de carbono para los microorganismos. Es importante recordar que el microorganismo siempre utilizará en primera instancia el nutriente que le requiera menor inversión energética.

**FUENTES DE NITRÓGENO.** El nitrógeno es un componente de primer orden de las proteínas y los ácidos nucleicos, y constituyen

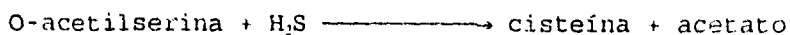
cerca de 10% del peso seco de la célula bacteriana típica. El nitrógeno puede suministrarse en diversas formas y la capacidad de asimilarlo de los microorganismos varía. El producto final de todas las vías de la asimilación del nitrógeno es la forma más reducida del elemento, el ion amonio ( $\text{NH}_4^+$ ).

Muchos microorganismos poseen capacidad para asimilar el nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y el nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) de manera reductiva al convertir a estos iones en amoníaco ( $\text{NH}_3$ ).

La capacidad para asimilar  $\text{N}_2$  de manera reductiva por medio del  $\text{NH}_3$ , que se llama fijación de nitrógeno, es una propiedad de los procariotas, y son relativamente pocas las bacterias que poseen esta capacidad metabólica.

La mayor parte de los microorganismos pueden recurrir al  $\text{NH}_4^+$  como fuente única de nitrógeno, y muchos microorganismos poseen la capacidad para producir ion a partir de aminas ( $\text{R-NH}_2$ ). Se introduce el amoníaco en la materia orgánica por vías bioquímicas que abarca al glutamato y a la glutamina.

**FUENTES DE AZUFRE.** Al igual que el nitrógeno, el azufre es un componente de muchas sustancias celulares orgánicas. Los aminoácidos sulfurados como metionona y cisteína constituyen parte de la estructura de diversas coenzimas. La mayor parte de los microorganismos pueden reducir al sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) como fuente de azufre, al reducir al sulfato al nivel de sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Algunos microorganismos pueden asimilar directamente el  $\text{H}_2\text{S}$  del medio de cultivo, pero compuesto es tóxico para muchos otros. La asimilación directa del  $\text{H}_2\text{S}$  se produce por la reacción de la O-acetilserina sulfhidrolasa:



El azufre reducido formado de manera metabólica ( $H_2S$ ) se transfiere directamente desde un portador metabólico hacia la O-acetilserina.

**FUENTES DE FÓSFORO.** Se requiere fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) como componente de ATP, ácidos nucleicos y coenzimas como NAD, NADP y flavinas. Además, se fosforilan muchos metabolitos y algunas proteínas. El fosfato se asimila siempre como fosfato inorgánico libre y soluble.

**FUENTES DE MINERALES.** En la función enzimática se requiere de muchos materiales. Los iones magnesio ( $Mg^{+2}$ ) y ferroso ( $Fe^{+2}$ ) se encuentran también en los derivados de las porfirinas. Tanto el  $Mg^{+2}$  como  $K^+$  son esenciales para la función y la integridad de los ribosomas. Se requiere  $Ca^{+2}$  como constituyente de las paredes celulares de las bacterias grampositivas, aunque es indispensable también para las bacterias gramnegativas. Muchos microorganismos  $Na^+$  para crecer. Al formular un medio para el cultivo de la mayor parte de los microorganismos es indispensable brindarles fuentes de potasio, calcio, hierro y magnesio; pueden requerirse también muchos minerales, como manganeso, molibdeno, cobalto, cobre y zinc; éstos se encuentran en el agua del grifo o como contaminantes de otros ingredientes del medio o bien por la adición de sales como cloruros, nitratos, sulfatos, etc.

## 2.2.5 FACTORES DE CRECIMIENTO.

Se llama factor de crecimiento a un compuesto orgánico (vitaminas o aminoácidos) que requiere la célula para su

El azufre reducido formado de manera metabólica ( $H_2S$ ) se transfiere directamente desde un portador metabólico hacia la O-acetilserina.

**FUENTES DE FÓSFORO.** Se requiere fosfato ( $PO_4^{3-}$ ) como componente de ATP, ácidos nucleicos y coenzimas como NAD, NADP y flavinas. Además, se fosforilan muchos metabolitos y algunas proteínas. El fosfato se asimila siempre como fosfato inorgánico libre y soluble.

**FUENTES DE MINERALES.** En la función enzimática se requiere de muchos materiales. Los iones magnesio ( $Mg^{+2}$ ) y ferroso ( $Fe^{+2}$ ) se encuentran también en los derivados de las porfirinas. Tanto el  $Mg^{+2}$  como  $K^+$  son esenciales para la función y la integridad de los ribosomas. Se requiere  $Ca^{+2}$  como constituyente de las paredes celulares de las bacterias grampositivas, aunque es indispensable también para las bacterias gramnegativas. Muchos microorganismos  $Na^+$  para crecer. Al formular un medio para el cultivo de la mayor parte de los microorganismos es indispensable brindarles fuentes de potasio, calcio, hierro y magnesio; pueden requerirse también muchos minerales, como manganeso, molibdeno, cobalto, cobre y zinc; éstos se encuentran en el agua del grifo o como contaminantes de otros ingredientes del medio o bien por la adición de sales como cloruros, nitratos, sulfatos, etc.

### 2.2.5 FACTORES DE CRECIMIENTO.

Se llama factor de crecimiento a un compuesto orgánico (vitaminas o aminoácidos) que requiere la célula para su

metabolismo y crecimiento, pero que es incapaz de sintetizar a partir de otros compuestos. Cada uno de estos compuestos esenciales se sintetiza mediante una secuencia definida de reacciones enzimáticas; cada enzima se produce con la regulación de un gen específico. El microorganismo debe obtener el compuesto del ambiente.

## 2.2.6 FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN EL CRECIMIENTO

Un medio de cultivo adecuado debe contener todos los nutrimentos requeridos por el microorganismo y factores como pH, temperatura y aireación deberán ser controlados cuidadosamente. Se emplea un medio líquido o gelificado para ciertos fines específicos agregando agar o gel de sílice. El agar es un polisacárido que se extrae de un alga marina, es particularmente adecuado para el cultivo de microorganismos por que resiste la acción microbiana y se disuelve a 80°C, pero no forma gel hasta que se enfría a 45°C; las células pueden ser suspendidas en el medio a 45°C y después enfriar éste rápidamente, hasta obtener un gel sin dañarlas.

**NUTRIMENTOS.** Anteriormente se mencionó la función de cada tipo de nutrimento. En general deben proporcionarse las siguientes sustancias: Aceptores de hidrógeno, fuentes de carbono, fuentes de hidrógeno, minerales (azufre, fósforo y oligoelementos), factores de crecimiento (aminoácidos, purinas, pirimidinas, vitaminas) y fuentes energéticas.

**CONCENTRACIÓN DE IONES HIDRÓGENO pH.** La mayor parte de los microorganismos tienen una gama de pH bastante reducida. Casi

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**



todos los microorganismos (neutrófilos) tienen su temperatura óptima en un pH de 6.0 a 8.0, aunque algunos (acidófilos) tienen un pH óptimo de 3.0 y algunos otros (alcalófilos) tan alto como 10.5.

Los microorganismos regulan su pH interno a pesar del pH externo. Los acidófilos mantienen su pH interno de 6.5 aproximadamente sobre los límites internos de 1.0 a 5.0; los neutrófilos mantienen un pH alrededor de 7.5 en medios externos con límites externos de pH de 5.5 a 8.5 y los alcalófilos mantienen un pH aproximado de 9,5 en medios con límites externos de 9.0 a 11.0.

**TEMPERATURA.** Las especies microbianas varían ampliamente en sus fluctuaciones de la temperatura óptima de desarrollo: las psicrófilas se desarrollan mejor de 15 a 20°C; las formas mesófilas lo hacen mejor de 30 a 37°C y la mayor parte de las termófilas entre 50 y 60°C. La mayor parte de los microorganismos son mesófilos.

El límite superior de la gama de temperatura tolerado por cualquier especie se correlaciona con la estabilidad térmica de sus proteínas y con la estabilidad enzimática. Los microorganismos, al igual que vegetales y animales tienen respuesta al choque térmico.

La relación de la velocidad de crecimiento con la temperatura, se observa en una gráfica típica de Arrhenius (Fig. 2.3). Arrhenius demostró que el logaritmo de la velocidad de cualquier reacción química ( $\log K$ ) es una función lineal recíproca de la temperatura ( $1/T$ ); puesto que el crecimiento de los microorganismos es resultado de un conjunto

todos los microorganismos (neutrófilos) tienen su temperatura óptima en un pH de 6.0 a 8.0, aunque algunos (acidófilos) tienen un pH óptimo de 3.0 y algunos otros (alcalófilos) tan alto como 10.5.

Los microorganismos regulan su pH interno a pesar del pH externo. Los acidófilos mantienen su pH interno de 6.5 aproximadamente sobre los límites internos de 1.0 a 5.0; los neutrófilos mantienen un pH alrededor de 7.5 en medios externos con límites externos de pH de 5.5 a 8.5 y los alcalófilos mantienen un pH aproximado de 9,5 en medios con límites externos de 9.0 a 11.0.

**TEMPERATURA.** Las especies microbianas varían ampliamente en sus fluctuaciones de la temperatura óptima de desarrollo: las psicrófilas se desarrollan mejor de 15 a 20°C; las formas mesófilas lo hacen mejor de 30 a 37°C y la mayor parte de las termófilas entre 50 y 60°C. La mayor parte de los microorganismos son mesófilos.

El límite superior de la gama de temperatura tolerado por cualquier especie se correlaciona con la estabilidad térmica de sus proteínas y con la estabilidad enzimática. Los microorganismos, al igual que vegetales y animales tienen respuesta al choque térmico.

La relación de la velocidad de crecimiento con la temperatura, se observa en una gráfica típica de Arrhenius (Fig. 2.3). Arrhenius demostró que el logaritmo de la velocidad de cualquier reacción química ( $\log K$ ) es una función lineal recíproca de la temperatura ( $1/T$ ); puesto que el crecimiento de los microorganismos es resultado de un conjunto

de reacciones químicas, cabe esperar que se muestre esta relación, como puede verse por arriba y debajo de los límites normales, el log de K disminuye rápidamente, de modo que los valores máximos de temperatura están definidos.

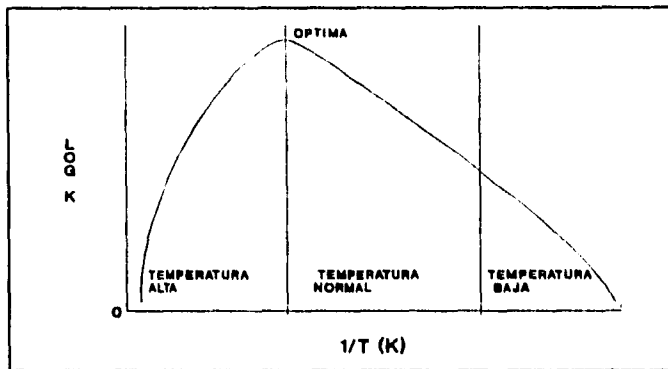


Fig. 2.3 Gráfica de Arrhenius del crecimiento bacteriano.

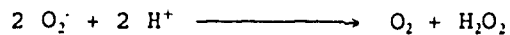
Además de su efecto en la velocidad de crecimiento, las temperaturas extremas inhiben a los microorganismos; el frío extremo también inhibe a las células microbianas, aunque no puede utilizarse con tanta seguridad como el calentamiento para esterilizar. Las bacterias también exhiben el fenómeno denominado choque térmico, en el que las células mueren por un enfriamiento rápido.

**REQUERIMIENTOS GASEOSOS.** Muchos microorganismos son aerobios obligados, requiriendo específicamente oxígeno como aceptor de hidrógeno; otros son facultativos y capaces de vivir anaerobiamente; algunos otros son anaerobios obligados, requiriendo una sustancia diferente al oxígeno como aceptor de

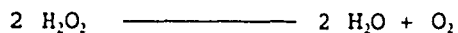
hidrógeno, para estos el oxígeno es tóxico. En la figura 2.4 podemos ver en que regiones de un tubo de ensayo, atendiendo al contenido de oxígeno se daría el crecimiento bacteriano.

La toxicidad del oxígeno para los microorganismos anaerobios obligados se debe a la reducción (del oxígeno) por enzimas en las células a peróxido de hidrógeno y por el ion ferroso, careciendo del mecanismo para destruir al radical libre muy tóxico superóxido  $O_2^-$ . La toxicidad del peróxido de hidrógeno se debe a que causa daños al DNA.

La toxicidad del peróxido de hidrógeno se debe a que causa daños al DNA. Los microorganismos aerobios o los anaerobios aerotolerantes están protegidos (hay excepciones) por la superoxidodismutasa, una enzima que cataliza la reacción:



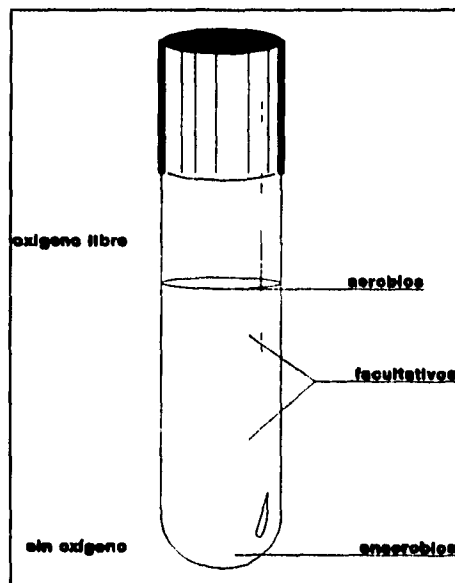
que en presencia de catalasa:



Los requerimientos de oxígeno son variables entre las diferentes especies y la provisión de aire en algunos cultivos aerobios es un problema técnico importante. Frecuentemente la difusión del oxígeno se vuelve el factor limitante para el crecimiento de las bacterias aerobias; cuando se alcanza una concentración de 4 a  $5 \times 10^9$  células por ml, la velocidad de difusión de oxígeno hacia las células se limita la velocidad de crecimiento ulterior.

Por otra parte, las bacterias anaerobias estrictas deben carecer de oxígeno, esto puede lograrse de varias maneras:

agregando al medio de cultivo agentes reductores, los tubos con cultivo pueden sellarse con parafina o con una capa de vaselina, el cultivo puede colocarse en un recipiente del que se elimina el oxígeno por evacuación o por medios químicos o puede colocarse al microorganismo en una caja anaerobia.



**Fig. 2.4** Crecimiento bacteriano. Requerimientos gaseosos.

### 2.2.7 AISLAMIENTO DE UN TIPO PARTICULAR DE MICROORGANISMOS

Si una pequeña muestra de una fuente natural se manipula con propiedad, proporcionará un tipo diferente de microorganismo por cada microambiente presente, ésto significa que cientos de tipos diferentes de microorganismos pueden aislarse. Se selecciona el medio adecuado para favorecer el crecimiento de cierto tipo de microorganismo, así habrá un mayor crecimiento del microorganismo que se desea aislar. El medio se emplea para permitir la competencia y por tanto la selección óptima, aun cuando el tipo deseado esté representado por unas cuantas células en una población de millones. Se puede sacar ventaja del enriquecimiento natural; por ejemplo, para buscar bacterias oxidantes del queroseno se elige un suelo cargado con aceite, ya que tal suelo es desde luego un medio de enriquecimiento para tales formas.

Entonces el cultivo de enriquecimiento es un procedimiento mediante el cual se prepara el medio para duplicar el medio natural (nicho) del microorganismo deseado, seleccionándolo por lo tanto. Un principio importante relacionado con dicha selección es el siguiente: El microorganismo seleccionado será aquél cuyos requerimientos nutricionales sean apenas satisfechos. Por ejemplo, *Azotobacter* se desarrolla mejor en un medio que contenga nitrógeno orgánico, pero su requerimiento mínimo puede ser satisfecho por la presencia de  $N_2$ ; por lo tanto, se selecciona un medio que contenga  $N_2$  como única fuente de nitrógeno. Si se añade nitrógeno orgánico se amplían las formas microbianas para las cuales el nitrógeno orgánico es un requerimiento mínimo.

Cuando se busca un tipo de microorganismo en un material natural, constituye una ventaja, inocular microorganismos obtenidos, sobre un medio diferencial si está disponible. Un medio diferencial es el que permite que las colonias de un tipo particular de microorganismos tenga un aspecto distintivo y puedan así ser diferenciados. En la tabla 2.1 se muestran algunos cultivos de enriquecimiento.

CONSTITUYENTES DE TODOS LOS MEDIOS: $MgSO_4$ , $K_2HPO_4$ , $FeCl_3$ , $CaCl_2$ , $CaCO_3$ , oligoelementos.				
FUENTES DE NITRÓGENO	FUENTES DE CARBONO	ATMÓSFERA	ILUMINACIÓN	ORGANISMO PREDOMINANTE
$N_2$	$CO_2$	Aerobia o anaerobia	Obscuridad	Ninguno
			Luz	Cianobacterias
	Alcohol, ácidos grasos, etc.	Anaerobia	Obscuridad	Ninguno
		Aire	Obscuridad	Azotobacter
	Glucosa	Anaerobia	Obscuridad	<i>Clostridium pasteurianum</i>
		Aire	Obscuridad	Azotobacter
$NaNO_3$	$CO_2$	Aerobia o anaerobia	Obscuridad	Ninguno
			Luz	Algas verdes y cianobacterias
	Alcohol, ácidos grasos, etc.	Anaerobia	Obscuridad	Desnitrificantes
		Aire	Obscuridad	Aerobios
	Glucosa	Anaeribia	Obscuridad	Fermentadores
		Aire	Obscuridad	Aerobios
$NH_4Cl$	$CO_2$	Anaerobia	Obscuridad	Ninguno
		Aerobia	Obscuridad	Nitrosomas
		Aerobia o anaerobia	Luz	Algas verdes y cianobacterias
	Alcohol, ácidos grasos, etc.	Anaerobia	Obscuridad	Reductores de sulfatos o carbonatos
		Aerobia	Obscuridad	Aerobios
	Glucosa	Anaerobia	Obscuridad	Frementadores
		Aerobia	Obscuridad	Aerobios

Tabla 2.2 Cultivos de enriquecimiento.



## 2.3 MUERTE DE MICROORGANISMOS.

Para una célula microbiana, muerte significa la pérdida irreversible de la capacidad de reproducirse (crecimiento y división). La prueba empírica de la muerte es el cultivo de las células en medio sólido: una célula se considera muerta si es incapaz de producir una colonia en cualquier medio. Obviamente, la variedad de la prueba depende de la elección del medio y de las condiciones. Un cultivo en el que 99% de las células muertas aparecen "muertas" en término de capacidad de formar colonias en un medio, puede resultar 100% viable si se prueba en otro medio.

Las condiciones de incubación en la primera hora consecutiva al tratamiento, son también críticas en la determinación de muerte. Por ejemplo, si las células bacterianas se irradian con luz ultravioleta y se siembran inmediatamente después en cualquier medio, puede resultar que el 99.99% de las células se hayan muerto. Si tales células irradiadas se incuban primero en una solución reguladora adecuada (buffer) por 20 minutos, por el contrario, la siembra indicará la muerte de sólo el 10%. En otras palabras, la irradiación determina que una célula muera si se siembra inmediatamente, pero vive si se le permite reparar el daño de la irradiación anterior de la siembra.

Así, una célula microbiana no se destruye físicamente, sólo está muerta en términos de las condiciones empleadas para probar su viabilidad. Cuando se trabaja con microorganismos,

habitualmente no se mide la muerte de una célula individual sino la muerte de una población.

## 2.4 AGENTES ANTIMICROBIANOS.

Comúnmente se hace uso de los siguientes términos en relación con los agentes antimicrobianos y su empleo:

**BACTERIOSTÁTICO.** Que tiene la propiedad de inhibir la multiplicación bacteriana; ésta se reanuda en cuanto se retira el agente.

**BACTERICIDA.** Que tiene la propiedad de matar a las bacterias. La acción bactericida difiere de la bacteriostasis únicamente en que es irreversible; es decir, el microorganismo muerto no puede reproducirse más, aun cuando el agente se retire. En algunos casos el agente causa lisis (destrucción) de las células, en otros casos las células permanecen intactas e inclusive pueden continuar metabólicamente activas.

**ESTÉRIL.** Exento de vida de cualquier clase. La esterilización puede realizarse por filtración (por el caso de líquidos o aire) o por tratamiento con agentes microbicidas. Dado que el criterio de muerte para los microorganismos es su capacidad para reproducirse; el material estéril puede contener células microbianas metabólicamente inactivas.

**DESINFECTANTE.** Una sustancia química empleada para matar microorganismos sobre superficies, pero demasiado tóxica para aplicarla directamente a los tejidos.

**SÉPTICO.** Caracterizado por la presencia de microorganismos patógenos en el tejido vivo.

**ASÉPTICO.** Caracterizado por la falta de microorganismos patógenos.

### 2.4.1 AGENTES FÍSICOS

**Calor.** La aplicación de calor húmedo es el método más simple para esterilizar material, a condición de que éste no sufra daño en sí mismo por el calor. Una temperatura de 100°C matará a todas las formas de bacterias en dos o tres minutos, excepto a las esporas; para matar a éstas se requiere calor húmedo a una temperatura de 121°C, durante 15 minutos. Generalmente se usa el vapor, tanto por que las bacterias se mueren más rápidamente cuando se encuentran húmedas por que el vapor proporciona un medio de distribuir el calor uniformemente en todas las paredes del recipiente de esterilización. El vapor debe conservarse a una presión de 1000g/cm<sup>2</sup> sobre la presión atmosférica para obtener una temperatura de 121°C; con propósito se utilizan las autoclaves o las ollas de presión.

Para esterilizar materiales que deben permanecer secos se dispone de hornos eléctricos por los que circula aire caliente; en vista de que el calor es menos eficaz en materiales secos, se acostumbra aplicar una temperatura de 160 a 170°C durante una hora o más.

En las condiciones descritas anteriormente (a temperaturas excesivas aplicadas por largos períodos de tiempo), el calor actúa desnaturizando las proteínas y los ácidos nucleicos de

la célula y fragmentando las membranas celulares.

**RADIACIÓN.** La luz ultravioleta y las radiaciones ionizantes tienen varias aplicaciones como agentes esterilizantes. Dañan al DNA de varias maneras, por ejemplo, inducen el entrecruzamiento entre pirimidias adyacentes en una u otra de las dos tiras de polinucleótidos, formando dímeros pirimídicos; las radiaciones ionizantes producen roturas en las tiras sencillas y en las dobles. Las lesiones al DNA inducidas por radiación y compuestos químicos destruyen a la célula.

#### 2.4.2 AGENTES QUÍMICOS

**Alcoholes.** Los compuestos con la estructura  $RCH_2OH$  son tóxicos para las células en concentraciones relativamente altas. Los alcoholes etílico ( $CH_3CH_2OH$ ) e isopropílico ( $[CH_3]_2CHOH$ ) son de uso común. En las concentraciones generalmente empleadas (90 a 95% en solución acuosa) actúan como desnaturizadores de las proteínas.

**FENOL.** El fenol y muchos compuestos fenólicos son agentes bactericidas fuertes. En las altas concentraciones en que generalmente se emplean (1 a 5% en soluciones acuosas) desnaturizan las proteínas.

**Iones de metales pesados.** Las sales de mercurio, plata y cobre, desnaturizan las proteínas en concentraciones altas, pero son demasiado perjudiciales para los tejidos humanos. Comúnmente se emplean en muy bajas concentraciones, en estas condiciones actúan combinándose con los grupos sulfhidrilo (las proteínas

enzimáticas que contienen cisteína, tienen cadenas laterales que terminan en grupos sulfhidrilo, se encuentran también cuando menos en la coenzima A, requerida para la transferencia del grupo acilo). El mercurio se puede emplear con seguridad para uso externo, combinándolo con compuestos orgánicos; su valor práctico es dudoso, debido a que se inactiva por acción de materia orgánica extraña.

**AGENTES OXIDANTES.** Los agentes oxidantes fuertes inactivan a las células oxidando grupos silfhidrilo libres. Entre los agentes útiles pueden mencionarse peróxido de hidrógeno, yodo, hipocloritos, cloro y compuestos que liberan cloro lentamente.

**AGENTES ALQUILANTES.** Numerosos agentes sustituyen átomos lábiles de hidrógeno como radicales alquilo. Los dos agentes de tipo se usan comúnmente con fines de desinfección son el formaldehído y el óxido de etileno. gas se mezcla con CO<sub>2</sub> al 90% para evitar que explote.

**DETERGENTES.** Los compuestos que tienen la propiedad de concentrarse en las interfases son llamados agentes tensoactivos. La interfase entre la membrana de una célula bacteriana que contiene lípidos y el medio acuoso que la rodea atraen a una clase particular de compuestos tensoactivos, de manera específica a los que contienen un grupo liposoluble o un grupo hidrosoluble. Los hidrocarburos de cadena larga son muy liposolubles, mientras que los iones cargados son muy solubles en agua; un compuesto que posea ambas esructuras pueden en esta forma concentrarse en la superficie de la célula bacteriana.

**DETERGENTES ANIÓNICOS.** Los detergentes sintéticos y las sales biliares disuelven la capa lipídica de la membrana citoplasmática y coagulan las proteínas de la misma.

**DETERGENTES CATIONICOS.** Desorganizan la función normal de la membrana celular. Las células expuestas a los detergentes dejan escapar compuestos solubles de nitrógeno y de fósforo hacia el medio de cultivo de microorganismos.

## 2.5 ACERCA DE LAS BACTERIAS EN ESTUDIO.

La corrosión puede acelerarse debido a la presencia de microorganismos microbianos, ya sea porque fabrican sustancias agresivas, porque actúan como catalizadores de las reacciones o porque infieren con el acceso de oxígeno ocasionando así corrosión por aireación diferencial. Existen varios microorganismos que contribuyen a la corrosión, hongos, esporas, percebes, mejillones, pero la mayoría de los organismos activos son bacterias, que en muchos casos permiten que la corrosión ocurra en circunstancias en las que no se esperaría tenerla, por ejemplo a pH neutro y en ausencia virtual de oxígeno. Los microorganismos pueden crear "micronichos", en los que viven en una relación de comensalismo microorganismos aerobios y anaerobios.

Este estudio se realizó con dos bacterias, una anaerobia y otra aerobia para comparar la influencia de cada una de ellas en la corrosión. Para realizar el estudio de la corrosión inducida por bacterias en condiciones aerobias en acero A.I.S.I. 1010 se utilizó la bacteria facultativa aerobia *Pseudomonas aeruginosa*, proveniente de una cepa que como se comprobó en el desarrollo experimental era pura.

La bacteria anaerobia utilizada para estudiar la corrosión

microbiológica en medio anaerobio fue *Desulfovibrio desulfuricans*, aislada de una mezcla de bacterias sulfatorreductoras provenientes de una fuente natural (oleoducto situado en el Estado de Tabasco); esta mezcla de bacterias se sembró en un medio selectivo para *Desulfovibrio desulfuricans* con la finalidad de estudiar el impacto en la corrosión de esta bacteria sulfatoreductora.

Para conseguir lo anterior es necesario conocer las principales características de las bacterias en estudio. En este capítulo las presentamos en forma de cuadros sinópticos para facilitar su consulta . En el capítulo siguiente veremos su relación con la corrosión electroquímica.

<b><i>Desulfovibrio desulfuricans</i></b>	
<b>TAXONOMÍA</b>	
Orden	<i>Pseudomonadales</i>
Suborden	<i>Pseudomonadineae</i>
Familia	<i>Spirillaceae</i>
Género	<i>Desulfovibrio</i>
Especie	<i>desulfuricans</i>
<b>CARACTERÍSTICAS CELULARES</b>	
Morfología	Vibriones ligeramente curvos.
Movilidad	Móvil.
Flagelo	Flagelo polar.
Tinción	Gram negativo; las células viejas pueden verse negras por presencia de cloruro de fierro.
Habitat	Suelo, agua de mar, aguas residuales.
Se encuentran	Solas, en pares o cadenas.
Tamaño	0.5 a 1 por 1 a 5 $\mu\text{m}$ .
<b>CARACTERÍSTICAS DE CULTIVO</b>	
Colonias en agar (peptona glucosa)	Colonias opacas, pequeñas, ligeramente elevadas, circulares (anaerobio).
Agua de mar	Turbidez opalescente, producida en mayor medida en medio enriquecido con sulfato y peptona en presencia de oxígeno.

Tabla 2.3 *Desulfovibrio desulfuricans*.



<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	
<b>CARACTERÍSTICAS DE CULTIVO</b>	
En medios con aminoácidos que contengan azufre (cisteína), en presencia de sales de hierro.	Se lleva a cabo una fermentación proteica (producción de H <sub>2</sub> S), con un aditivo (FeSO <sub>4</sub> ) se forma el sulfuro de hierro, compuesto insoluble de color negro.
<b>FACTORES DE CRECIMIENTO</b>	
Oxígeno	Anaerobio
Temperatura	Óptima 25 a 30°C.
pH	Óptimo 6 a 7.5 Rango 5 a 9.
Nutrición	La carencia simultánea de algunos factores de crecimiento retarda el crecimiento de las células.
<b>CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS</b>	
<b>BIOQUÍMICA</b> Los compuestos que reduce	Sulfuro de hidrógeno (3100mg/l), sulfatos, sulfitos, tiosulfatos, hiposulfitos y sulfuros.
Los compuestos utilizados como donadores de electrones.	Peptona, aspargina, lactato, glicerina, alanina, malato.
Fermentación de:	
Monosacáridos	Glucosa
Alcoholes	Alcohol propílico, glicerol.
<b>PATOLOGÍA</b>	
Humanos	Sin patología reportada.
Animales	Sin patología reportada.

Tabla 2.3 *Desulfovibrio desulfuricans*.

<b><i>Pseudomonas aeruginosa</i></b>	
<b>TAXONOMÍA</b>	
Orden	<i>Pseudomonadales</i>
Suborden	<i>Pseudomonadineae</i>
Familia	<i>Pseudomonadaceae</i>
Género	<i>Pseudomona</i>
Especie	<i>aeruginosa</i>
Sinónimo	<i>Pseudomona pyocyanea</i>
<b>CARACTERÍSTICAS CELULARES</b>	
Morfología	Barras
Movilidad	Habitualmente posee un flagelo polar, pero puede tener dos o tres.
Flagelo	Flagelo polar.
Tinción	Gram negativo.
Habitat	Suelo, agua, aguas residuales, muy adaptable.
Se encuentran	Solas, en pares o cadenas.
Tamaño	0.5 a 0.6 por 1.5 $\mu\text{m}$ .
<b>CARACTERÍSTICAS DE CULTIVO</b>	
Colonias en agar	Tonalidades de neutro a verde, alargadas, extendidas, centro gris o negro.
Olor	Los cultivos tienen olor a trimetilamina.
Color	Pigmentos azuloso no fluorescente piocianina; verde fluorescente pioverdina; rojo oscuro piorrubina; negro piomelanina.

**Tabla 2.4** *Pseudomonas aeruginosa*.

<b><i>Pseudomonas aeruginosa</i></b>	
<b>FACTORES DE CRECIMIENTO</b>	
Oxígeno	Facultativa aerobia.
Temperatura	Óptima 37°C. buen crecimiento a 42°C
pH	ácido o básico.
Nutrición	Puede utilizar hidrocarburos.
<b>CARACTERÍSTICAS FISIOLÓGICAS</b>	
<b>BIOQUÍMICA</b> Los compuestos que reduce	Nitratos
Fermentación de: Monosacáridos	Glucosa
Disacáridos	Ninguno
Polisacáridos	Ninguno
Alcoholes	Ninguno
<b>PATOLOGÍA</b>	
Humanos	Infección en oídos, vías urinarias, orofaringe, pulmones; lesiones cutáneas.
Animales	Afecta a conejos, ratones y puercos.

Tabla 2.4 *Pseudomonas aeruginosa*.

# **CAPÍTULO 3**

## **CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA**

---

La corrosión biológica no es un tipo de corrosión; es una deterioración de los metales por procesos de corrosión que ocurren directa o indirectamente como un resultado de la actividad de los organismos. Estos organismos incluyen micro formas, por ejemplo una bacteria y macro formas por ejemplo un hongo.

La corrosión microbiológica incluye todo fenómeno de destrucción en el cual estos microorganismos, ya sea que actúen directa, indirectamente o por medio de las sustancias provenientes de su metabolismo, desempeñan un papel importante al acelerar un proceso ya establecido o al crear las condiciones favorables para que se produzca dicho fenómeno. Así la actividad biológica puede influir en la corrosión en una variedad de ambientes incluyendo suelo, agua natural y agua de mar, productos del petróleo y emulsiones de aceite.

En la actualidad los deterioros de mayor importancia en materiales de gran resistencia, se deben en parte a la acción de los microorganismos. La corrosión biológica es un caso especial de deterioro de materiales tales como: comida, madera, textiles, etc. en presencia de microorganismos. Los metales ferrosos y los concretos están más propensos a este tipo de corrosión. La corrosión inducida por microorganismos ha sido documentada para metales, aleaciones, procesos químicos, alimentos enlatados, suelo y agua desmineralizada entre otros. El agua siempre contiene un cierto número de microorganismos, aun cuando su suministro se hace a través de modernas redes de distribución. Todos los procesos de tratamiento de agua involucran procesos microbianos. Muchas reacciones óxido-reducción están influidas biológicamente. En la mayor parte de los sistemas, los efectos microbianos son perjudiciales al proceso que utiliza el agua o al sistema. Sin embargo, en

algunas operaciones industriales se ponen a trabajar los microbios en una forma útil, por ejemplo, los proceso de lodo activado emplean microbios para la digestión de desechos orgánicos y también se emplean microbios para la fermentación de bebidas.

Al proceso de formación de biopelículas microbianas de composición y espesor variados desarrolladas en todas las superficies en contacto con ambientes acuosos se conoce como depósito biológico (biofouling). La corrosión metálica y la formación de biopelículas tradicionalmente habían sido evaluadas por separado; estos son procesos independientes que ocurren simultáneamente o secuencialmente en la superficie del metal. Sin embargo, con el desarrollo de técnicas electroquímicas y analíticas se puede cuantificar el impacto de microorganismos en los fenómenos electroquímicos y proporcionar detalles del mecanismo de corrosión; ha sido demostrado que los microorganismos inician y controlan la corrosión localizada.

Little et al. revisaron factores que influían en la adhesión de microorganismos a las superficies. Las superficies rugosas favorecen el proceso de formación de biopelículas durante las primeras etapas del proceso y puede influir en la rapidez de acumulación. La temperatura del seno del medio influye en la rapidez de las reacciones bioquímicas y químicas. Los microorganismos son capaces de mantener ambientes únicos en las biopelículas que difieren del seno del electrólito.

algunas operaciones industriales se ponen a trabajar los microbios en una forma útil, por ejemplo, los procesos de lodo activado emplean microbios para la digestión de desechos orgánicos y también se emplean microbios para la fermentación de bebidas.

Al proceso de formación de biopelículas microbianas de composición y espesor variados desarrolladas en todas las superficies en contacto con ambientes acuosos se conoce como depósito biológico (biofouling). La corrosión metálica y la formación de biopelículas tradicionalmente habían sido evaluadas por separado; estos son procesos independientes que ocurren simultáneamente o secuencialmente en la superficie del metal. Sin embargo, con el desarrollo de técnicas electroquímicas y analíticas se puede cuantificar el impacto de microorganismos en los fenómenos electroquímicos y proporcionar detalles del mecanismo de corrosión; ha sido demostrado que los microorganismos inician y controlan la corrosión localizada.

Little et al. revisaron factores que influían en la adhesión de microorganismos a las superficies. Las superficies rugosas favorecen el proceso de formación de biopelículas durante las primeras etapas del proceso y puede influir en la rapidez de acumulación. La temperatura del seno del medio influye en la rapidez de las reacciones bioquímicas y químicas. Los microorganismos son capaces de mantener ambientes únicos en las biopelículas que difieren del seno del electrólito.

### 3.1 RELACIÓN ENTRE MICROORGANISMOS Y CORROSIÓN.

El establecimiento de una población microbiana capaz de generar una celda electroquímica en la superficie del metal y por su actividad modifica los procesos electroquímicos. Los microorganismos en la superficie del metal crecen, se reproducen y forman conglomerados considerados como anomalías físicas en la superficie del metal. El resultado de este crecimiento es la formación de ánodos y cátodos locales y la creación de una diferencia de aireación en la celda. Bajo condiciones aeróbicas, las áreas abajo de las colonias llegan a ser anódicas y los alrededores son zonas catódicas. Una biopelícula madura previene la difusión de oxígeno a sitios catódicos y la difusión de aniones agresivos, tales como el cloruro, a sitios anódicos.

También se impide la difusión hacia el exterior de metabolitos y productos de corrosión. Si algunas áreas en la biopelícula llegan a ser anaeróbicas, por ejemplo si la rapidez de respiración aeróbica en la biopelícula es mayor que la rapidez de difusión de oxígeno, el mecanismo catódico cambia.

Las reacciones en las biopelículas son localizadas (Fig. 3.1) y, es conveniente aclarar y especificar la actividad de los microorganismos en las biopelículas como aerobios y anaerobios y como especies individuales, los microorganismos pueden formar comunidades sinérgicas que conducen a procesos combinados que cada uno por separado no podrían lograr.



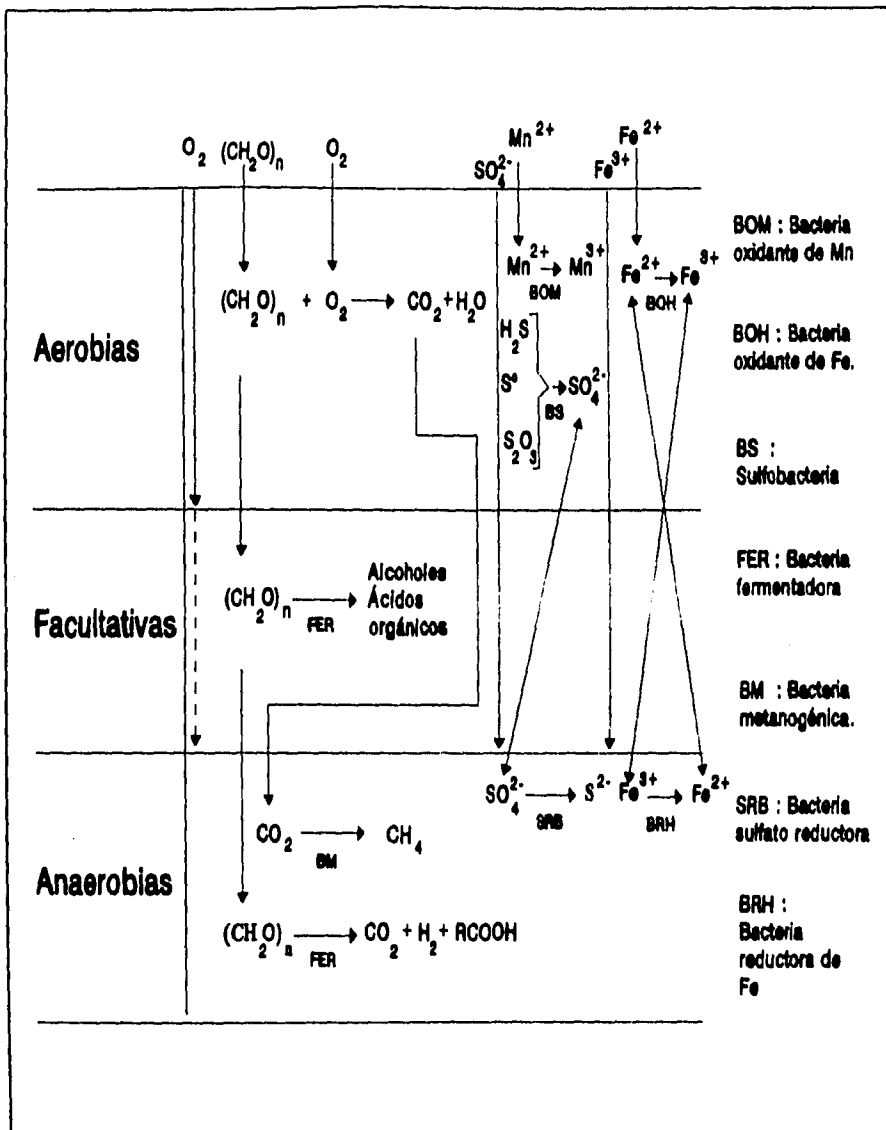


Fig. 3.1 Estratos con una típica biopelícula y las posibles reacciones en ellos.

Sin embargo, algunas especies microbianas pueden afectar a la corrosión por algunos mecanismos. Los microorganismos se sostienen por medio de reacciones químicas. Esto es que utilizan un reactivo o alimento para eliminar productos de desecho. Estos procesos pueden afectar a la corrosión de las siguientes formas:

1. Por influencia directa de las reacciones anódicas y catódicas.
2. Por influencia de las películas en la superficie.
3. Por medio de crear condiciones corrosivas.
4. Por la producción de depósitos.

Estos efectos pueden ocurrir en forma simple o compleja, dependiendo del ambiente y de la especie o especies microbianas involucradas.

### **3.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN.**

En términos generales, puede decirse que estos factores son de tres tipos:

- a. El estado en el que se encuentra el material.
- b. La influencia del medio ambiente.
- c. La acción de los microorganismos.

### **3.2.1 EL ESTADO EN EL QUE SE ENCUENTRA EL MATERIAL.**

Este aspecto es muy importante; la estructura, las alteraciones de la superficie (por mínimas que éstas sean) o el deterioro mecánico que presenta 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. Prácticamente todas las tuberías presentan imperfecciones que favorecen la acumulación de microorganismos.

### **3.2.2 LA COMPOSICIÓN DEL MEDIO.**

**1. LA COMPOSICIÓN QUÍMICA.** La composición química del medio desempeña una función de primer orden. El contenido de oxígeno y de gas carbónico en éste llevará a la formación de óxidos y de carbonatos, especialmente en los puntos que presentan deterioro. Además, el oxígeno favorecerá al desarrollo de los microorganismos aerobios y, por otra parte, el gas carbónico servirá como fuente de carbono para las bacterias autótrofas.

La presencia de iones minerales, nitrógeno, fósforo, azufre, hierro, manganeso, calcio, etc.; en forma de nitratos, fosfatos, sulfatos o sulfuro, aportará los elementos necesarios para el crecimiento de las bacterias. Éstas utilizarán dichos elementos para su propia síntesis u obtendrán de la transformación de éstos la energía necesaria para su metabolismo y como consecuencia un aumento de la población e incremento de los productos de ese metabolismo.

Del mismo modo, las bacterias quimiorganótrofas utilizarán

los compuestos orgánicos. De hecho, todas las aguas distribuidas en la naturaleza y que no han sufrido alteración, presentan un contenido de sales minerales y de materias orgánicas que permiten el crecimiento de las bacterias.

**2. LA TEMPERATURA.** Cada microorganismo tiene una temperatura óptima en la cual su desarrollo se acelera, y dicha temperatura se encuentra por lo general alrededor de 28°C a 35°C, tratándose de microorganismos mesófilos. Por el contrario, ciertas esporas pueden resistir temperaturas mucho más bajas o mucho más elevadas.

**3. pH.** El pH desempeña una función importante; la acidez o alcalinidad del medio tienen al principio una acción directa sobre el metal y luego, de acuerdo con el grado que presente, favorecen o inhiben el desarrollo de las bacterias. En general, el pH óptimo se encuentra alrededor de la neutralidad.

**4. LUZ.** La luz condiciona el desarrollo de las bacterias fotolitótrofas, y asimismo, de las fotoorganótrofas.

### 3.2.3 LA ACCIÓN DE LOS MICROORGANISMOS.

**1. HONGOS.** Se trata de organismos heterótrofos que pueden causar importantes daños provocados por sus actividades enzimáticas. En el medio los hongos secretan, además, numerosos ácidos orgánicos.

**2. ALGAS.** Son organismos autótrofos que se desarrollan en presencia de la luz. Se trata de organismos que proporcionan la materia orgánica necesaria para el crecimiento de los otros

microorganismos. Como sucede en el caso de los hongos, también las algas secretan enzimas que atacan numerosos substratos, madera, papel, etc., y que pueden asimismo metabolizar sustancias ácidas corrosivas. Por otra parte, las algas conducen a la formación de lodos o sedimentos que pueden favorecer el desarrollo de bacterias anaerobias.

3. **BACTERIAS.** Las bacterias asociadas con la corrosión comúnmente se dividen en tres géneros: Ferrobacterias, Sulfobacterias y Bacterias Sulfato Reductoras, que pueden tener lugar en un grupo estrictamente anaerobio o en un grupo estrictamente aerobio (Tabla 3.1).

### ***Ferrobacterias.***

Las ferrobacterias obtienen la energía necesaria para su síntesis a partir de la transformación de las sales ferrosas en sales férricas. En un punto de alguna tubería de metal ferroso, que no este protegido o que se encuentre alterado y que este en contacto con el agua puede ocurrir el ataque del metal que da lugar a la formación de hidróxido ferroso, éste en condiciones normales se transforma en hidróxido férrico y en carbonato debido a el oxígeno y gas carbónico disueltos, por lo general el fenómeno se detiene ahí. La presencia de las ferrobacterias en el punto que el metal ha sufrido el ataque va a provocar la movilización de los iones ferrosos y su transformación en sales férricas, esto sucede con rapidez siempre que el medio tenga iones ferrosos.

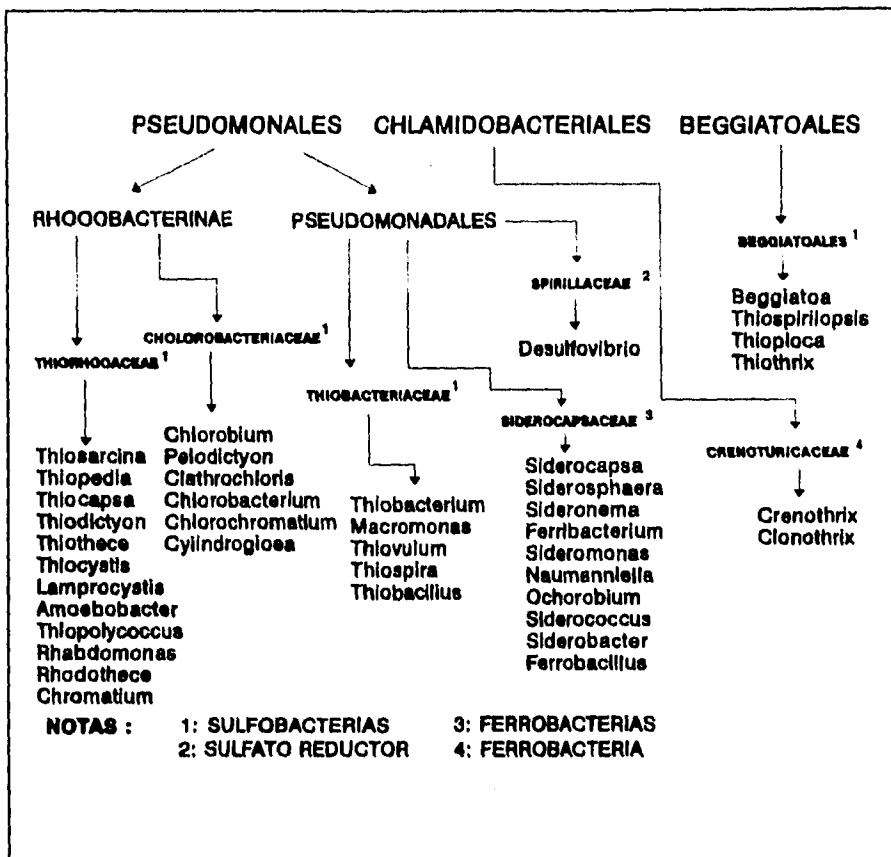


Tabla 3.1 Bacterias asociadas a la corrosión.

**Sulfobacterias.**

Las sulfobacterias metabolizan azufre a partir de compuestos azufrados reducidos y lo expulsan al medio ambiente o lo almacenan, lo cual provocará una formación de lodos, o bien, lo oxidan formando productos ácidos (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), esto conducirá a una acidificación corrosiva.

### ***Bacterias sulfato reductoras.***

**Familia Spirillaceae.** Esta familia comprende numerosos géneros, de entre los cuales algunas especies presentan la posibilidad de reducir los sulfatos mediante la producción de ácido sulfhídrico o bien, de reducir el gas carbónico por formación de metano. De esta familia el género *Desulfovibrio*, tiene la capacidad de reducir los sulfatos y desempeña un papel importante dentro de la corrosión biológica.

Estas bacterias son anaerobias obligadas por lo que se encuentran bajo las capas de herrumbre que se encuentran en contacto con el metal. Estas bacterias transforman los sulfatos en ácido sulfhídrico el cual se combina con sales ferrosas para formar un sulfuro negro. 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 estas se encuentren o no bajo tierra.

### **BACTERIAS QUE INVOLUCRAN TRANSFORMACIONES DE AZUFRE.**

El átomo de azufre pasa por varios estados de oxidación por las bacterias presentes en el suelo (Fig. 3.2). Los organismos aeróbicos del género *Thiobacillus*, convierten azufre a ácido sulfúrico, los organismos anaeróbicos del género *Desulfovibrio* y *Desulfotomaculum*, reducen sulfatos a ácido sulfhídrico, probablemente la mayor causa de corrosión atribuida a microorganismos.

***Thiobacillus.*** Estas bacterias son aeróbicas, ellas derivan su energía de la oxidación primaria del azufre, tiosulfatos o

ambos y su principal producto metabólico son los sulfatos. El mecanismo por el cual esta bacteria ataca el azufre y lo oxida a sulfatos aún no está completamente comprendido. Un miembro importante de este grupo es el *Thiobacillus thiooxidans*, es común encontrarlo en suelos o en medios acuosos, la corrosión ácida de esta bacteria es fácilmente reconocida por las condiciones fuertemente ácidas que generan.

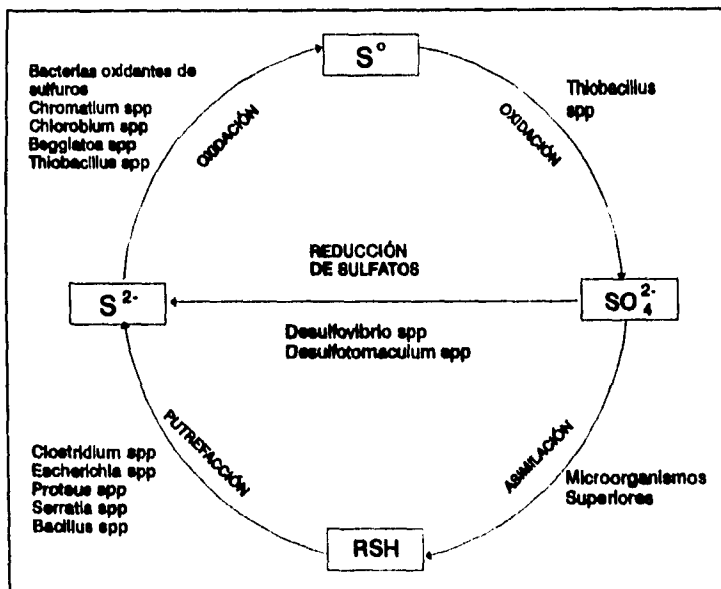


Fig. 3.2 Ciclo del azufre.

*Desulfovibrio*. Los miembros del género *Desulfovibrio* son formadores de esporas, son vibriones ligeramente curvos de longitud variable (0.5-1 a 1-5 $\mu$ m) se encuentran aislados o en



pequeñas cadenas y tienen la apariencia de espirales (Fig.3.3). Son bacterias muy móviles gracias a un flagelo polar.

Estos organismos son estrictamente anaeróbicos, reducen sulfatos los cuales actúan como aceptor del electrón terminal para su proceso de respiración, el ácido sulfhídrico es el producto final.



**Fig. 3.3** *Desulfovibrio desulfuricans* (ampliación: 25,000; reducción para reproducción 30%) (Ref. 13)

Estos organismos utilizan el hidrógeno catódico para la reducción de sulfatos y estimulan la disolución anódica del

hierro con la subsecuente precipitación del sulfuro de hierro como un producto de corrosión. El hábitat de estas bacterias puede ser el agua de mar, el limo marino, el agua dulce y el suelo.

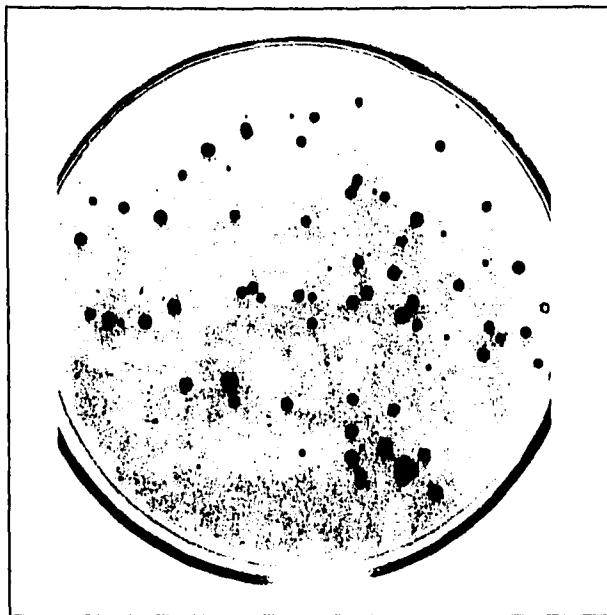
*Desulfovibrio desulfuricans*. Bastoncillos ligeramente curvos que miden de 0.5 a 1  $\mu\text{m}$  por 1 a 5  $\mu\text{m}$ . Se les encuentra aislados, aunque algunas veces en pequeñas cadenas. Son bacterias gramnegativas de gran movilidad gracias a su flagelo polar.

Para cultivar in vitro *Desulfovibrio sp* se emplea un medio que generalmente contiene:

1. Una fuente de electrones, hidrógeno o donadores orgánicos tal como el lactato.
2. Un aceptor del electrón: usualmente sulfatos.
3. Un buffer: generalmente fosfato monopotásico.
4. Una o más sales inorgánicas, incluyendo cloruro de amonio como una fuente de nitrógeno.
5. Una sal ferrosa como indicador del crecimiento (formación de  $\text{H}_2\text{S}$ ), extracto de levadura el cual estimula el crecimiento y uno o más agentes reductores.

En la figura 3.4 se muestran las colonias de *Desulfovibrio desulfuricans* en un medio sólido. La corrosión anaeróbica es fácilmente reconocida en una tubería porque presenta picaduras negruscas y productos de corrosión con olor. Los productos de corrosión se oxidan rápidamente en presencia de aire y deben examinarse inmediatamente. La identificación de la bacteria requiere de cuidados especiales ya que se requiere de condiciones estrictamente anaerobias.

Dentro del género *Desulfovibrio* se encuentran: *aestuari*, *rubentschikii*, *vulgaris*, *africanus*, *gigas*, *saalexigens*.



**Fig. 3.4** Colonias de *D. desulfuricans* en medio sólido con iones de hierro después de siete días de incubación a temperatura ambiente, se muestra un precipitado negro alrededor de las colonias.

*Desulfotomaculum*. Los miembros del este género son formadores de esporas, de ellos sólo uno es termofílico, es el *Desulfatomaculum nigrificans*, este organismo está asociado con la corrosión de alimentos enlatados.

**BACTERIAS INVOLUCRADAS EN LAS TRANSFORMACIONES DEL HIERRO.**

Son un grupo diverso de bacterias las cuales están asociadas con la oxidación de iones ferrosos a iones férricos. Algunas de las formas más comúnmente encontradas son:

**Ferrobacillus.** El *Ferrobacillus ferroxidans* es estrictamente autótrofo, deriva su energía de la oxidación de hierro ferroso a férrico, es capaz de acelerar la oxidación de la pirita ( $\text{FeS}_2$ ). El medio corrosivo formado por esta bacteria tiene un pH entre 2 y 3, muestra depósitos cafés del sulfato férrico y contiene ácido sulfúrico libre.

**Gallionella.** De las especies que precipitan hierro, la *Gallionella* es la que comúnmente se considera, ya que estos organismos se encuentran frecuentemente en muelles, riachuelos, y pueden llegar al interior de las tuberías donde se encuentran asociadas con otras bacterias en nódulos, tales como *Leptothrix* y *Crenothrix*.

**OTRAS BACTERIAS.**

Hay una variedad amplia de bacterias que producen sulfuro de hidrógeno como un resultado de la putrefacción. Miembros del género *Pseudomonas*, así como otras bacterias, producen mercaptanos. Ciertas bacterias, que se conoce que poseen la enzima hidrogenasa (una enzima capaz de activar el hidrógeno molecular), pueden posiblemente estar involucradas en procesos de corrosión. En estas se podrían incluir: (a) la bacteria de hidrógeno (*Hydrogenomonas*), estos organismos obtienen su energía de la oxidación de  $\text{H}_2$  usando oxígeno como aceptor del

electrón, (b) la bacteria reductora de nitratos, la cual usa nitratos como aceptor del electrón terminal, y (c) la bacteria de metano, la cual usa  $\text{CO}_2$  como aceptor del electrón terminal.

Además de las ferrobacterias, sulfobacterias y bacterias sulfato reductoras ya descritas, existen también en el agua numerosos microorganismos de diverso origen y que constituyen lo que se denomina como zooplacton y fitoplacton. Estos organismos ocasionan olores y sabores desagradables del agua, en realidad dichos microorganismos no constituyen factores de corrosión, a pesar de ello, si desempeñan un papel de gran importancia en dicho fenómeno, puesto que favorecen el desarrollo de ciertas bacterias quimiorganótrofas. Los desechos producidos por estas diferentes especies, así como también su propia biomasa libera en el medio una cantidad de elementos nutritivos suficientes para acelerar la proliferación de todas las bacterias heterótrofas. De esta forma, es como en las zonas estancadas causan la formación de núcleos de bacterias susceptibles de contaminar toda una red de distribución de agua. Tales concentraciones se encuentran principalmente en aquellos lugares donde el caudal de agua es escaso o no existe (tubos de desviación, sifones y fondos de cisternas).

#### **COMBINACIÓN DE BACTERIAS.**

Las formas de corrosión bacteriana mencionadas se han tratado como grupos de bacterias individuales. En la naturaleza es muy común, que dos o más tipos de bacterias relacionadas con la corrosión realicen el proceso simultáneamente. Las asociaciones de este tipo han sido estudiadas, por ejemplo:

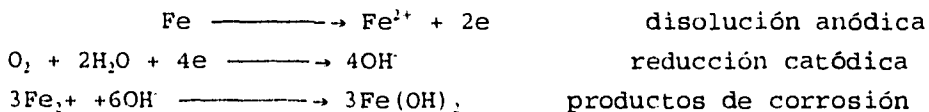
*Reducción de sulfatos y formación de ácidos.* Se involucran las bacterias sulfato reductoras y el *Thiobacillus*.

*Reducción de sulfatos y oxidación de sulfuro.* Algunas bacterias incluyendo el *Thiobacillus*, oxidan sulfuro a azufre elemental. Éste es altamente corrosivo para metales ferrosos y puede contribuir a la acelerada corrosión observada en condiciones anaeróbicas.

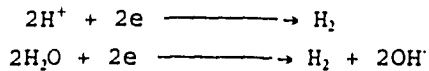
*Ferrobacillus y Thiobacillus.* El *Thiobacillus* casi siempre se encuentra asociado con el *Ferrobacillus* y juntos generan más ácido, y así acelerar la corrosión que uno sólo podría producir.

### 3.3 MECANISMOS DE CORROSIÓN BIOLÓGICA.

La corrosión es un proceso electroquímico en el cual un metal es oxidado y transferido a la solución, ésta es la reacción "anódica". El balance, la reacción "catódica" es la reducción simultánea de algunos componentes en el ambiente corrosivo. Los iones metálicos en solución subsecuentemente pueden precipitar como productos insolubles. En condiciones favorables pueden desarrollarse películas protectoras. El mecanismo general de corrosión bajo estas condiciones está dado por las siguientes ecuaciones :



En ausencia de oxígeno las reacciones catódicas usualmente son la reducción de iones hidrógeno o agua :



La rapidez de estas reacciones se limita a soluciones neutras y esto modera el proceso de corrosión. El criterio importante es que las reacciones anódicas y catódicas deben proceder en balance para así conservar la electroneutralidad. Estas reacciones básicas y otros factores asociados con la heterogeneidad de la superficie del metal, tales como : variaciones en la concentración de oxígeno en el ambiente, concentración de aniones agresivos en la solución y en la superficie del metal juegan un papel importante.

Las tres categorías del proceso de corrosión más importantes son:

1. Producción de un metabolito ácido, por ejemplo ácidos orgánicos y/o inorgánicos o los productos finales de la fermentación.
2. Corrosión debida a diferencias de aireación y celdas de concentración debido a la absorción de nutrientes (oxígeno para el crecimiento microbiano adherido a la superficie del metal).
3. Interferencia en el proceso catódico bajo condiciones libres de oxígeno por bacterias estrictamente anaerobias.

Estudios recientes indican que los puntos 2 y 3 son los más comunes.

El mecanismo de corrosión es simplemente la formación de

celdas de concentración debido a los requerimientos de oxígeno para la colonización microbiana. La superficie pobremente aireada llega a ser el ánodo de la celda mientras las regiones más aireadas de los depósitos dan el balance de la reacción catódica. La corrosión debida a la formación de metabolitos ácidos es usualmente asociada con las bacterias del género *Thiobacillus thiooxidans* o *Thiobacillus ferrooxidans* y los hongos conocidos como *Cladosporium resinae*.

### **3.4 CORROSIÓN BAJO CONDICIONES AERÓBICAS.**

Los microorganismos pueden simular un proceso corrosivo por la producción de agentes oxidantes o despolarizantes los cuales son usualmente productos metabólicos o productos indirectos que resultan de la acción de los microorganismos en la superficie del metal.

La colonización en la superficie de los metales por un amplio rango de organismos aeróbicos siempre fomenta la corrosión debida a la formación de diferencias de aireación y celdas de concentración química.

#### **3.4.1 FORMACIÓN DE DIFERENCIAS DE AIREACIÓN Y CELDAS DE CONCENTRACIÓN QUÍMICA.**

Está bien establecido que las variaciones en la concentración de oxígeno o concentración de iones en la superficie del metal puede ser por corrientes eléctricas y que estas corrientes juegan un papel importante en la corrosión de muchos metales.



Muchos microorganismos tienen una tendencia natural de adherirse a las superficies, donde forman masas o películas celulares y en donde si existen los nutrientes que permitan desarrollar su actividad metabólica serán capaces de crecer sobre la misma superficie o en una zona inmediata a ella. La concentración de oxígeno bajo tales películas pueden llegar a ser agotada debido a la exclusión del oxígeno y la utilización de oxígeno como un resultado de las reacciones metabólicas de los microorganismos. Cuando la diferencia de la concentración de oxígeno incrementa, se forma un potencial entre la superficie del metal pobremente aireada abajo de la película y las regiones más aireada alrededor de la película.

El metal migra en solución hacia las áreas anódicas de baja concentración de oxígeno abajo de la película, los electrones se combinan con agua y oxígeno para formar los iones hidroxilo en las áreas catódicas mayormente oxigenadas (Fig. 3.5).

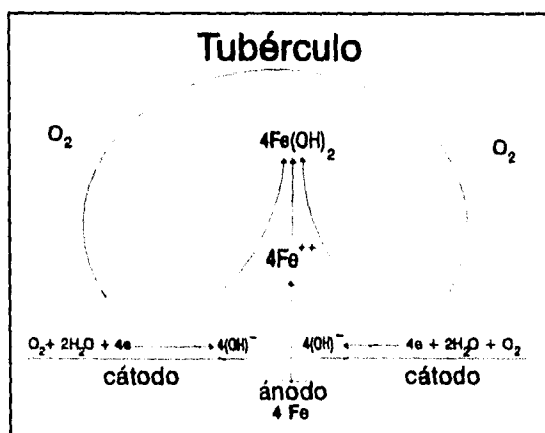
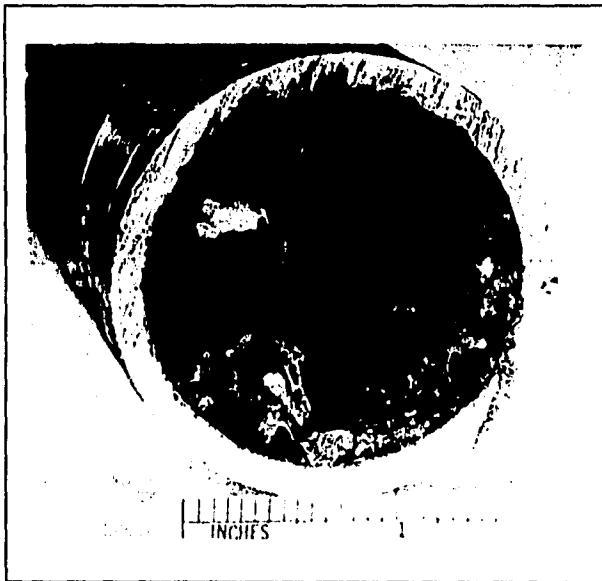


Fig. 3.5 Celda de concentración de oxígeno.

El picado es el tipo de corrosión que se observa en el interior de las superficies de las tuberías de agua y se piensa que es debido a este mecanismo principalmente. La tuberculación es usualmente asociada con esto (Fig. 3.6), un tubérculo o nódulo de productos de corrosión y microorganismos se forma sobre cada orificio de la superficie.



**Fig. 3.6** Interior de una tubería de acero la cual muestra una tuberculación extensa.

Las bacterias sulfato reductoras han sido aisladas de estos tubérculos dentro de las tuberías, esto indica que el ambiente en la base y dentro de los tubérculos debe ser

anaeróbico extremo y debe esperarse una considerable diferencia en la concentración de oxígeno si el flujo de agua en la tubería esta bien aireada. La formación de tubérculos debido a la actividad de las bacterias que oxidan el hierro se debe a que estos organismos oxidan iones ferrosos a iones férricos en solución con la consecuente precipitación y acumulación de hidróxido férrico en el interior de las tuberías. La pequeña área debajo del depósito llega a ser anaeróbica la cual presenta severa corrosión localizada.

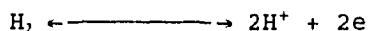
Se han encontrado situaciones análogas en las tuberías de los tanques de aluminio que contenían combustible para aviones. La bacteria *Pseudomonas aeruginosa* se ha encontrado en el interior de estos tubérculos. El picado que ocurre abajo de la película de microorganismos se debe probablemente a la formación de celdas de concentración de oxígeno, pero muchas veces la bacterias sulfato reductoras pueden estar también involucradas. Las celdas de concentración química o celdas de concentración de sales se forman cuando dos electrodos idénticos están en contacto con una solución de concentración diferente.

Los microorganismos, por sus actividades metabólicas, tienen la habilidad de concentrar o diluir varios iones. Las dificultades técnicas encontradas en el estudio y determinación de la concentración iónica abajo de una pequeña masa de microorganismos en la superficie de un metal probablemente son una razón de la escasez de publicaciones en esta área.

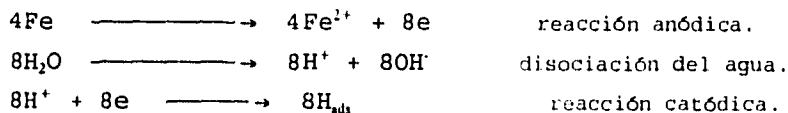
### 3.5 CORROSIÓN BAJO CONDICIONES ANAERÓBICAS.

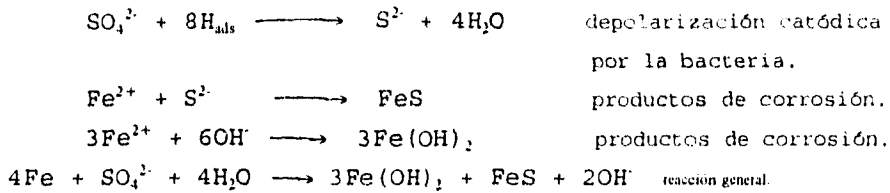
De las reacciones consideradas anteriormente sobre el mecanismo general de corrosión, la corrosión importante de metales ferrosos no debería esperarse que se diera bajo condiciones de deficiencia de oxígeno. Sin embargo en la práctica, a menudo ocurre una severa corrosión bajo esas condiciones y los órdenes de magnitud pueden ser mucho más grandes que en condiciones normales de aireación.

Esta corrosión podría atribuirse a la actividad de las bacterias sulfato reductoras y a su habilidad para utilizar el hidrógeno catódico vía su enzima hidrogenasa para la reducción de sulfatos. Se ha postulado que la hidrogenasa es capaz de catalizar la oxidación reversible del hidrógeno molecular.



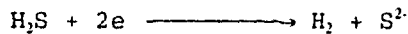
De acuerdo con Scott (Ref. 46) los estudios recientes indican que esto es infundado. Sin embargo, ha sido un lazo importante en el estudio del mecanismo de corrosión anaerobia. Von Wolzogen Kuhr y Van der Vlugt sugirió las siguientes reacciones:



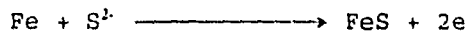


Desafortunadamente este mecanismo no toma en cuenta los productos de corrosión, ácido sulfhídrico y/o sulfuro ferroso. Las reacciones anteriores describen el proceso general como una depolarización catódica, basada en la teoría de que las bacterias sulfato reductoras contienen a la enzima que remueve al hidrógeno atómico acumulado en el cátodo.

Es más comúnmente que bajo condiciones anaeróbicas la rapidez de corrosión se incrementen debido a la reducción de  $\text{H}_2\text{S}$  :



y a la aceleración de la reacción anódica debido a la formación de sulfuro de hierro :



Finalmente, se ha sugerido que la capa formada por el FeS formada en la última reacción cataliza la rapidez de reacción de reducción del oxígeno para hierro y acero con poros, dejando una capa de FeS que incrementa la rapidez de corrosión.

En la figura 3.7 se muestran las reacciones que se llevan a cabo en la corrosión causada por bacterias sulfato reductoras.

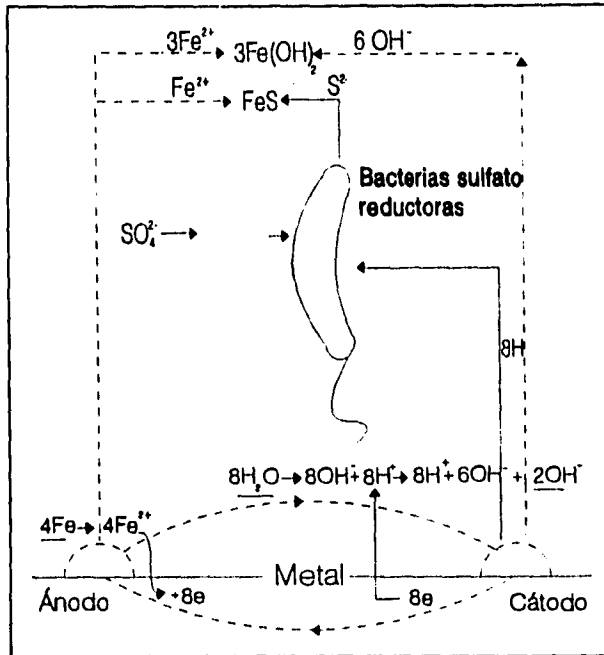
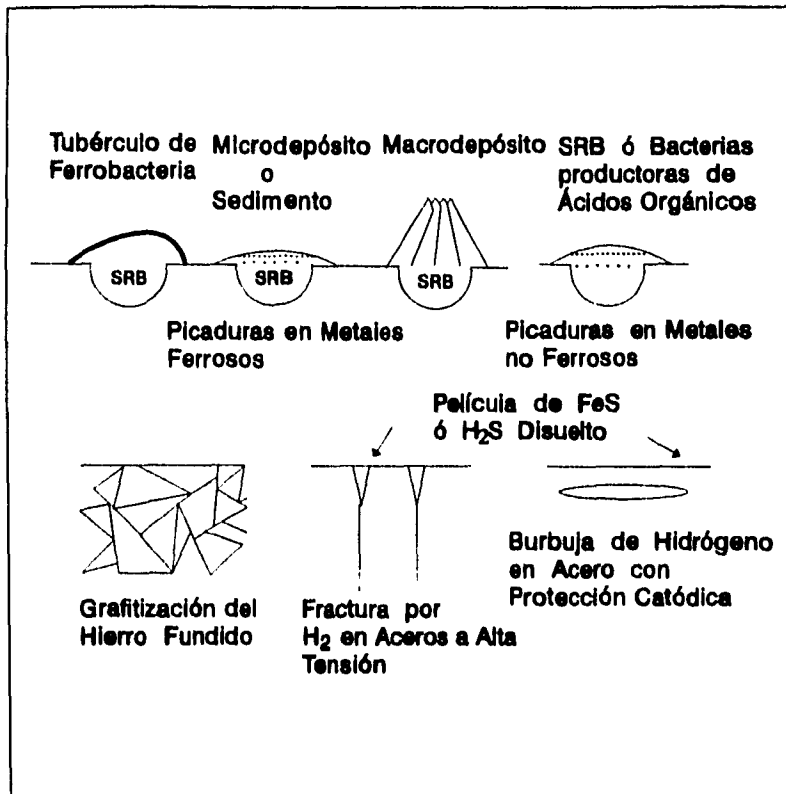


Fig. 3.7 Diagrama de las reacciones incidentes a la corrosión causada por las bacterias sulfato reductoras.

La corrosión por las bacterias sulfato reductoras toma dos distintas formas las cuales pueden ocurrir en una amplia variedad de ambientes (Fig. 3.8) :

1. **Picadura localizada** en el metal especialmente en acero estructural y aleaciones no ferrosas, causada por la actividad del crecimiento de las bacterias sulfato reductoras en la biopelícula de la superficie del metal.

2. **Corrosión por tensión** inducida por el sulfuro, fraccionamiento inducido por el hidrógeno y levantamientos causados por la penetración del hidrógeno en forma de sulfuro disuelto.



**Fig. 3.8** Algunos tipos de corrosión causados por el crecimiento de las bacterias SBR y su generación de sulfuro.

### 3.6 CORROSIÓN BIOLÓGICA E INDUSTRIAS INVOLUCRADAS

Un gran número de metales, tales como acero estructural, aleaciones de cobre, aleaciones de magnesio y zinc tienden a corroerse bajo la exposición de la superficie en ambientes acuosos. La rapidez de corrosión de estos metales en ambientes acuosos airados tiende a ser determinada por la rapidez a la cual el oxígeno disuelto puede ser liberado a la superficie del metal. Así la rapidez de corrosión se verá afectada por algunos cambios en la rapidez de transporte del oxígeno. Los organismos presentes en el ambiente tienen la capacidad de incrementar o disminuir el transporte de oxígeno, por consecuencia tienen la capacidad de incrementar o disminuir la rapidez de corrosión.

La mayoría de los microorganismos provocan corrosión general localizada, una de las razones de esto es que generalmente los organismos no forman películas uniformes y continuas en la superficie del metal.

La variedad de industrias que han tenido problemas por la corrosión microbiológica se enlistan en la tabla 3.2.

Las industrias mencionadas en la tabla son las más comúnmente publicadas en la literatura, esto no significa que estas industrias son las que están más propensas a este tipo de problemas, que otras industrias, pero significa que estas industrias han reconocido las causas de los problemas de corrosión y han tomado las medidas necesarias para resolver sus problemas.



INDUSTRIA	ÁREAS PROBLEMA
Industrias de procesos químicos.	Tanques de acero inoxidable, tuberías, especialmente después de las pruebas hidrostáticas con agua de ríos.
Generación de energía nuclear.	Tanques y tuberías de acero inoxidable y al carbón, sistemas de agua de enfriamiento, especialmente durante la construcción y pruebas hidrostáticas.
Industria de tuberías enterradas.	Suelos de arcilla saturados de agua, con pH cercanos a la neutralidad .
Industria de tratamiento de agua.	Tubería e intercambiadores de calor.
Industria de aviación.	Tanques de aluminio y tanques de almacenamiento de combustible.
Industria metalúrgica.	Máquinas de aceite y emulsiones.
Industria de mantenimiento de puentes.	Tubería de alcantarillado.
Industria de tratamiento y manejo de lodos.	Estructuras de concreto reforzadas y concreto.

**TABLA 3.2** Industrias afectadas por la corrosión biológica.

Los microorganismos más comúnmente encontrados en la industria se mencionan en la tabla 3.3.

Especie	pH	T (°C)	Oxígeno	Metales afectados	Acción
Desulfivibrio desulfuricans	4-8	10-40	Anaerobio	Fe, Al, Zn, Cu y Acero	Reduce $\text{SO}_4^{2-}$ a $\text{S}^{2-}$ .
Clostridium	6-8	10-40	Anaerobio	Fe, acero	Reduce $\text{SO}_4^{2-}$ a $\text{S}^{2-}$ .
Desulfomonas	...	10-40	Anaerobio	Fe, acero	Reduce $\text{SO}_4^{2-}$ a $\text{S}^{2-}$ .
Thiobacillus thiooxidans	1-8	10-40	Aerobia	Fe, acero Cu	Oxida $\text{S}^0$ a $\text{S}^{2-}$
Thiobacillus ferrooxidans	1-7	10-40	Aerobia	Fe, acero	Oxida $\text{Fe}^{2+}$ a $\text{Fe}^{3+}$
Gallionella	7-9	20-40	Aerobia	Fe, acero	Oxida $\text{Fe}^{2+}$ a $\text{Fe}^{3+}$
Sphaerotilus	7-9	20-40	Aerobia	Fe, acero	Oxida $\text{Fe}^{2+}$ a $\text{Fe}^{3+}$
S. natas	...	.....	.....	Al	Reducen $\text{Fe}^{3+}$ a $\text{Fe}^{2+}$
Pseudomonas	4-9	20-40	Aerobia	Fe, acero	
P. aureginosa	4-8	20-40	Aerobia	Fe, Al	

**TABLA 3.3** Microorganismos involucrados en corrosión biológica.

## **3.7 CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA DE DIFERENTES MATERIALES.**

### **3.7.1 CORROSIÓN BIOLÓGICA DEL HIERRO Y ACERO.**

Un gran número de casos involucran la corrosión microbiológica del hierro y el acero, generalmente las bacterias sulfato reductoras influyen en la corrosión del acero en condiciones totalmente anaerobias tales como suelos poco aireados y sedimentos marinos. Los microambientes anaerobios pueden existir debajo de los depósitos de los organismos aerobios. Los ambientes más corrosivos a menudo son aquellos en los que se encuentran alternando condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

La corrosión anaeróbica del hierro y acero se ha identificado en diversos ambientes: fondo de ríos, lagos y estuarios (especialmente cuando éstos contienen materia orgánica como una fuente de sulfatos para la bacteria sulfato reductora), debajo de depósitos marinos y varios ambientes industriales bajo nódulos o tubérculos en sistemas de agua de enfriamiento y áreas de tuberías de acero todos ellos con pH cercano a la neutralidad.

Otra causa de la corrosión del hierro y el acero es la formación de celdas de concentración de oxígeno, a menudo esta corrosión es acelerada por las bacterias que oxidan el hierro.

### 3.7.2 CORROSIÓN BIOLÓGICA DEL ALUMINIO.

La corrosión por picadura de los tanques de aluminio que contienen combustible de aviones ocurre bajo depósitos microbianos en la interfase combustible/agua.

Los organismos comúnmente responsables son *Pseudomonas*, *Cladosporium* y *Desulfovibrio*. Estos organismos generalmente trabajan conjuntamente para causar el ataque, actuar junto con formadoras de limo *Pseudomonas* para producir celdas de concentración de oxígeno debajo de los depósitos, donde se ha identificado a las bacterias sulfato reductoras.

### 3.7.3 CORROSIÓN BIOLÓGICA DEL COBRE.

Se conoce poco de la influencia de los microorganismos en el cobre y en sus aleaciones, en comparación con el hierro y el acero. Es conocido que los iones cuprosos son muy tóxicos para los organismos vivos pero esto no significa que las aleaciones de cobre sean inmunes a efectos de corrosión biológica. Esto significa que sólo aquellos microorganismos que tengan una alta tolerancia al cobre pueden lograr algún efecto substancial.

El *Thiobacillus thiooxidans*, por ejemplo puede resistir concentraciones tan altas como 2%. La mayoría de los casos reportados de corrosión microbiológica de aleaciones de cobre son causadas por la producción de sustancias corrosivas como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ , y ácidos orgánicos e inorgánicos. Es muy común tener bacterias formadoras de limo en el interior de las tuberías de los intercambiadores de calor y condensadores.

## **3.8 EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA**

La corrosión microbiológica como ya se mencionó puede ocurrir en diversos medios acuosos, es decir un medio que contenga una cantidad traza de agua, así la corrosión biológica es problema potencial porque los microorganismos están presentes en la mayoría de los sistemas acuosos y tienen la capacidad de influir en la corrosión en cualquier parte del mundo.

Una evaluación de la posibilidad que exista corrosión microbiológica se debe considerar como parte de una buena ingeniería para la planeación de un nuevo proceso. En esta consideración debe incluirse el agua que se usa para las pruebas hidrostáticas, aunque el proceso final pueda no contener ni una traza de agua.

No hay pruebas standard para determinar si los microorganismos están o no presentes, involucrándose en la iniciación o aceleración del proceso de corrosión, en un sitio dado. Algunos de los factores que se deben considerar para identificar la corrosión inducida por microorganismos son los que a continuación se mencionan.

### **3.8.1 USO DE DATOS HISTÓRICOS.**

La historia de los problemas de corrosión microbiológica, puede dar una gran cantidad de información respecto a los posibles problemas. Una investigación en los alrededores puede ayudar

a evaluar la información, especialmente cuando se está planeando una nueva instalación en un sitio no desarrollado.

La investigación deberá incluir problemas asociados con microbios en el agua y en el suelo. Durante la investigación, es útil tener a la mano algunos casos históricos con fotografías de la corrosión inducida por microorganismos.

La investigación de una fuente de agua puede incluir una lista de usuarios, si ésta es de algún sistema municipal. La lista de usuarios puede reducirse, seleccionando sólo aquellos que tengan un uso, para el agua, similar al que se va a usar en nuestro caso particular. Similar se refiere a la misma temperatura y pH porque los microorganismos generalmente son activos y causan problemas únicamente en un intervalo específico de temperatura y pH. La actividad microbiológica es un problema persistente en el agua desionizada en la cual se usan filtros extremadamente finos, éstos durante la filtración no remueven todos los microbios ni eliminan los problemas que pueden causar.

### **3.8.2 PRUEBAS PARA LA ACTIVIDAD MICROBIOLÓGICA.**

La fuente de agua y el suelo del sitio propuesto deberá someterse a pruebas de actividad microbiológica. Estas pruebas deberán hacerse bajo la inspección de un microbiólogo que tenga experiencia en corrosión microbiológica. Las pruebas de campo son frecuentemente empleadas como una técnica para la identificación y determinación de la población de algunas bacterias problema.

### 3.8.3 ANÁLISIS QUÍMICOS.

Los análisis químicos del agua y suelo en el sitio, ayuda a determinar si los nutrientes y fuentes de energía presentes son los necesarios para la actividad microbiológica. Por ejemplo, la presencia o ausencia de azufre y sus compuestos en el medio necesarios para el crecimiento de las bacterias sulfato reductoras o bacterias que oxidan azufre pueden determinarse por medio de análisis químicos.

Los análisis químicos deben hacerse con precaución, porque la disponibilidad de los nutrientes no es un factor totalmente determinante en la actividad microbiológica. Los microorganismos tienen la habilidad de adaptarse y poder usar fuentes de energía orgánicas e inorgánicas.

### 3.8.4 PRUEBAS DE CORROSIÓN.

No hay pruebas standard diseñadas específicamente para evaluar la susceptibilidad a la corrosión microbiológica. La presencia de algún microorganismo en el ambiente no introduce un nuevo tipo de corrosión, pero sí influye en los tipos de corrosión conocidos.

Las pruebas de campo se usan poco porque casi siempre la corrosión es localizada. Es más usual guiarse por el color peculiar asociado con determinados materiales o microorganismos. Por ejemplo, los depósitos o tubérculos se asocian con la corrosión en acero inoxidable y al carbón por un color café. La corrosión en aleaciones de cobre usualmente tiene un color verde. Las manchas negras de sulfuro de hierro

usualmente se asocian a las bacterias sulfato reductoras.

En los análisis químicos de los residuos asociados a la corrosión, generalmente muestran una disminución en la concentración de hierro y níquel y un incremento en la concentración de cromo y cobre, comparados con los niveles normales del material. En los residuos generalmente están presentes azufre, manganeso y cobre.

### **3.8.5 INTERPRETACIÓN Y USO DE LAS PRUEBAS DE CORROSIÓN.**

Los datos obtenidos de las pruebas deben analizarse cuidadosamente para poder tomar una buena decisión.

**CREDIBILIDAD DE LOS RESULTADOS.** Una prueba acelerada, únicamente puede indicar como se comporta el material en estudio bajo esas condiciones de prueba.

Los datos que podrán usarse directamente en el diseño o en el control de las operaciones, serán únicamente aquellos que sean obtenidos en situaciones en las cuales las pruebas de corrosión se realicen para dar una respuesta a un problema de corrosión dado en un ambiente y condiciones específicas.

Los resultados deben interpretarse en términos de comparación. Las interpretaciones son muy subjetivas porque dependen mucho del criterio del investigador. La interpretación de los resultados de las pruebas de corrosión son complicadas por el factor tiempo.



Las preguntas que deben contestarse son :

\* ¿Pueden ocurrir problemas serios de corrosión?, ¿En qué forma?, ¿Hay algún período de incubación ?.

\* ¿Cuál es la rapidez de corrosión?, ¿Cambia con el tiempo?.

\* ¿Cuales son las consecuencias de las fallas por corrosión en términos de seguridad pública, pérdidas de vidas, peligro de la propiedad y costo?

\* ¿Es necesaria una protección adicional?. Sí es así, ¿Qué tipo es mejor?, ¿Cuál es el tiempo de duración de esta protección?.

**PLANEACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.** Muchos investigadores tradicionalmente hacen uso de técnicas estadísticas para agregar credibilidad a la interpretación de los resultados.

Las computadoras personales son de gran ayuda para la realización de análisis estadísticos. El investigador únicamente requiere familiarizarse con los métodos estadísticos del diseño experimental y análisis de datos.

Con estas técnicas el investigador puede maximizar, la cantidad de información obtenida y la credibilidad de los resultados. ASTM G 16 es una guía comúnmente usada en los análisis estadísticos para pruebas de corrosión. ASTM G es una guía que puede ser útil para la evaluación de la corrosión por picado (Apéndice 5).

**ANÁLISIS DE RIESGOS.** Debe desarrollarse un análisis de riesgos en base a la información colectada. La información de las fuentes de agua, de los alrededores del sitio y los resultados de las pruebas deberán tomarse en cuenta en este análisis.

Las preguntas que deben contestarse son :

\* ¿Pueden ocurrir problemas serios de corrosión?, ¿En qué forma?, ¿Hay algún período de incubación ?.

\* ¿Cuál es la rapidez de corrosión?, ¿Cambia con el tiempo?.

\* ¿Cuales son las consecuencias de las fallas por corrosión en términos de seguridad pública, pérdidas de vidas, peligro de la propiedad y costo?

\* ¿Es necesaria una protección adicional?. Sí es así, ¿Qué tipo es mejor?, ¿Cuál es el tiempo de duración de esta protección?.

**PLANEACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS.** Muchos investigadores tradicionalmente hacen uso de técnicas estadísticas para agregar credibilidad a la interpretación de los resultados.

Las computadoras personales son de gran ayuda para la realización de análisis estadísticos. El investigador únicamente requiere familiarizarse con los métodos estadísticos del diseño experimental y análisis de datos.

Con estas técnicas el investigador puede maximizar, la cantidad de información obtenida y la credibilidad de los resultados. ASTM G 16 es una guía comúnmente usada en los análisis estadísticos para pruebas de corrosión. ASTM G es una guía que puede ser útil para la evaluación de la corrosión por picado (Apéndice 5).

**ANÁLISIS DE RIESGOS.** Debe desarrollarse un análisis de riesgos en base a la información colectada. La información de las fuentes de agua, de los alrededores del sitio y los resultados de las pruebas deberán tomarse en cuenta en este análisis.

### **3.9 USO Y LIMITACIONES DE TÉCNICAS ELECTROQUÍMICAS DE CORRIENTE DIRECTA EN LA INVESTIGACIÓN DE CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA.**

Los microorganismos influyen en la corrosión mediante cambios electroquímicos en la superficie del metal. Teóricamente, estos cambios puede tener muchos efectos, que pueden ser desde corrosión localizada, cambios en la rapidez general de corrosión hasta inhibición de la corrosión, sin embargo, el proceso de corrosión es electroquímico y las técnicas electroquímicas pueden usarse, teniendo cuidado de aplicarlas adecuadamente bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

La corrosión inducida por microorganismos raramente utiliza un mecanismo único o especies simples de microorganismos, por lo tanto es necesario tener mucho cuidado en la interpretación de los datos obtenidos mediante técnicas electroquímicas.

La interpretación de la corrosión microbiológica depende de la estructura de los productos de corrosión y películas pasivantes en el metal así como de la estructura de las biopelículas. Desafortunadamente los métodos electroquímicos han sido usados en electrólitos complejos, tales como medios de cultivo microbiológicos, donde las propiedades y características de las películas pasivantes no son completamente comprendidas. Se debe de tener en mente que la colonización microbiológica puede cambiar drásticamente la

resistencia de la caída de la película pasivante del metal, causando cambios en la concentración de aniones, pH, y gradientes de oxígeno en la superficie del metal. Estos cambios pueden hacer modificaciones importantes en la electroquímica del metal y en los parámetros electroquímicos medidos en los experimentos del laboratorio. Sin embargo, el uso apropiado de los métodos electroquímicos acoplados con cuidado al diseño del experimento, caracterización de la microbiología, componentes metalúrgicos y electroquímicos del sistema pueden ser muy útiles para un mejor entendimiento del mecanismo involucrado en el proceso de corrosión inducido por microorganismos.

### **3.9.1 POTENCIAL DE CORROSIÓN A CIRCUITO ABIERTO.**

El potencial a circuito abierto (potencial de corrosión) de un metal puede medirse determinando la diferencia de voltaje entre el metal inmerso en un medio corrosivo y un electrodo de referencia. Se han usado gráficas de potencial de corrosión contra tiempo para detectar el inicio del ataque atribuido a las bacterias, también se usan para seguir los efectos del desarrollo de las biopelículas en la corrosión acero en agua de mar.

### **3.9.2 POTENCIAL ÓXIDO-REDUCCIÓN (REDOX).**

Otro potencial útil para predecir si el metal va sufrir o no un incremento en la corrosión debida a microorganismos es el potencial óxido-reducción (redox) del ambiente. Éste se refiere al potencial relativo de una reacción electroquímica bajo condiciones de equilibrio donde no hay un flujo neto de

corriente eléctrica. El potencial redox de un ambiente, por ejemplo la mayoría de los suelos, es actualmente el potencial de equilibrio de la reacción de oxígeno con un electrodo de platino inmerso en el suelo. En el potencial redox, la rapidez de las reacciones de reducción y oxidación en la superficie del platino se consideran iguales, y el potencial redox, por si mismo, es una función de la concentración de oxígeno, de la temperatura y del pH, el potencial redox de un ambiente acuoso natural llega a ser más negativo (o activo) con la disminución de la concentración de oxígeno.

Las mediciones del potencial redox han sido usadas frecuentemente en microbiología para asegurar un medio satisfactorio para el crecimiento de las bacterias anaeróbicas SRB. Estos microorganismos requieren un ambiente con un potencial redox activo o deficiente de oxígeno (generalmente  $-400\text{mV}_{\text{SHE}}$ ). Este potencial también se ha utilizado para estimar la agresividad de los suelos alrededor de los metales enterrados, y se ha considerado por algunos autores como el factor más significativo en la valoración de la agresividad de las bacterias sulfato reductoras.

Este potencial es útil para caracterizar la corrosividad de medios de cultivo, para bacterias aerobias, en metales y aleaciones.

Estrictamente hablando, el potencial redox se define únicamente para reacciones electroquímicas bajo condiciones de equilibrio, tales condiciones pueden encontrarse en medios de cultivo estériles, pero usualmente no se encuentran en sistemas con organismos vivos, donde hay una actividad constante.

Sin embargo, las condiciones de equilibrio pueden darse en

medios de cultivo activos, y los potenciales redox medidos bajo estas condiciones pueden dar información útil de las características y cambios del ambiente como resultado del metabolismo microbiano.

### **3.9.3 MÉTODOS DE POLARIZACIÓN DE CORRIENTE DIRECTA.**

Los diagramas potencial-corriente son un método gráfico, que sirve para demostrar las relaciones entre los potenciales reversibles de los ánodos y cátodos y la polarización de las reacciones anódicas y catódicas. Desafortunadamente ni los potenciales reversibles ni las corrientes de corrosión pueden medirse directamente, de esta forma es necesario usar métodos indirectos. El procedimiento general, para medir los potenciales de corrosión, es usar un potencióstato con una celda de tres electrodos y polarizar el espécimen en dirección activa (catódica) o en dirección noble (anódica), o ambas; dependiendo del método estas polarizaciones pueden ser grandes o pequeñas. Las limitaciones y utilidad de algunas de estas técnicas para investigación de la corrosión microbiológica a continuación se mencionarán.

### **3.9.4 PENDIENTES DE TAFEL.**

Como ya mencionó, las gráficas de potencial contra log de la densidad de corriente donde se representan las líneas anódica y catódica, en teoría deben ser lineales y ambas curvas deben intersectarse en un punto que representa el potencial y la corriente de corrosión.

Experimentalmente, hay desviaciones de la linealidad en

las vecindades del potencial de corrosión, sin embargo ambos segmentos, referidos como pendientes de Tafel, tienen una parte lineal, las cuales extrapolando se obtiene un punto válido para el potencial y corriente de corrosión.

La técnica de extrapolación para medir  $J_{\text{corr}}$  depende del potencial de reposo y de la capacidad para identificar la región lineal. Los electrólitos en los que toma lugar más de una reacción de reducción o en los cuales ocurre polarización por concentración puede ser difícil identificar las regiones lineales, esto disminuye la validez de la técnica de extrapolación, en este caso puede usarse la técnica de resistencia a la polarización (RP) que más adelante se mencionará.

Se deben tener en mente algunas limitaciones cuando se apliquen estas técnicas en metales que presentan biopelícula.

Primero, las polarizaciones grandes pueden ocasionar muchos cambios en las condiciones electroquímicas en la superficie del metal, así como deterioros de los microorganismos en la biopelícula. Se recomienda que estas mediciones no se hagan periódicamente durante un experimento de corrosión, sí el propósito es seguir el efecto del desarrollo de la biopelícula con el tiempo. Sin embargo, con el propósito de investigar, una medición al principio y al final del experimento pueden dar información útil.

Segundo, estas mediciones solas no dan información de la distribución de la corrosión en la superficie del metal (la corrosión inducida por microorganismos generalmente es localizada) ni de la contribución relativa a la corrosión de la biopelícula. Esto significa que un trabajo cuidadoso y un

control del experimento bien diseñado son necesarios para obtener resultados útiles e interpretables.

### 3.9.5 TÉCNICAS DE BARRIDOS POTENCIODINÁMICOS.

Las técnicas potenciodinámicas son más útiles en la caracterización y algunas veces en la predicción de la corrosión de metales en sistemas de electrólitos en los cuales el metal se pasiva por la formación de una película protectora.

Las curvas anódica y catódica pueden ser afectadas suficientemente por cambios químicos de la solución, pH, temperatura, etc. La presencia de microorganismos en la superficie del metal, en forma de biopelícula en la superficie del metal o en discretas colonias, pueden originar tales cambios.

Una de las principales variables experimentales que puede ser manipulada es la velocidad de barrido. Durante estos barridos son aplicados potenciales grandes los cuales pueden afectar a los microorganismos en las biopelículas, como en el caso de polarización de Tafel. Así, deben tenerse algunas precauciones durante el desarrollo del experimento cuando es aplicado a corrosión inducida por microorganismos. Las biopelículas son afectadas por cambios en el pH y en la concentración de oxígeno e hidrógeno en la interfase metal-película; estas variables pueden afectarse con la velocidad de barrido aplicada en la técnica potenciodinámica. Velocidades rápidas pueden aplicarse a metales libres de película en un ambiente dado, con el fin de obtener una base de datos para una posible corrosión. Velocidades intermedias pueden seleccionarse para mantener una rapidez de formación de



película particular y velocidades pequeñas pueden usarse para mediciones en condiciones de reposo en presencia de una biopelícula madura.

### **3.9.6 DETERMINACIÓN DE LOS POTENCIALES DE PICADO.**

Los microorganismos, en la mayoría de los casos simulan formas localizadas de corrosión dependiendo de la película pasivante que se forme. Se pueden usar diferentes métodos para determinar el valor del potencial de picado (pitting potencial), que puede ser útil para definir la tendencia de los microorganismos a acelerar la corrosión de un metal en una solución dada. El término general de potencial de picado se usa en la literatura para definir una variedad de parámetros electroquímicos relacionados con la corrosión localizada. El valor numérico obtenido para el potencial de picado depende fuertemente de la técnica experimental usada para medirlo, y estrictamente hablando, el valor medido por cada una de las técnicas debería llamarse de una manera diferente. Por ejemplo, el potencial crítico de picado  $E_{cpp}$  se mide potenciodinámicamente en el laboratorio, la medición de éste depende de la geometría del espécimen y del aparato usado.

## **3.10 PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CORROSIÓN BIOLÓGICA.**

Los requerimientos iniciales más importantes para el control racional de la corrosión bacteriana es el uso de un sistema de

monitoreo que detecte este proceso en sistemas industriales individuales.

El segundo requerimiento para el control de la corrosión biológica, involucra las pruebas y evaluación de biocidas (productos químicos tóxicos para microbios). Las pruebas de biocidas pueden establecerse con la exposición de un agente biocida particular en una concentración específica en el sistema, esto se puede hacer con varios tipos de biocidas, las pruebas tienen como finalidad la de descalificar aquellos que no sean útiles para el sistema en cuestión.

Independientemente, de que se trate del terreno industrial o del medio doméstico, la proliferación de los microorganismos en las redes que forman las tuberías constituye un sin número de perjuicios; tales perjuicios se manifiestan con la obstrucción total o parcial de las tuberías, el taponamiento de las válvulas y la perforación inesperada de los materiales utilizados cuando éstos sufren la acción directa de los microorganismos.

Otra manifestación de los trastornos provocados es la producción de olores y sabores desagradables.

La desinfección de agua potable municipal y la esterilización del equipo para procesar alimentos y de hospitales son ejemplos de la aplicación de biocidas donde el objetivo es matar todos los microbios. Sin embargo, una exterminación completa es a menudo costosa y no siempre es necesaria. El agua de enfriamiento en empresas de servicio, acerías, refinerías y otras plantas industriales es tratada para controlar las poblaciones de microbios dentro de niveles que, conforme a la experiencia, puede tolerar el sistema sin

una esterilización completa.

Antes de emprender cualquier proceso de desinfección es necesario tener en consideración, los aspectos generales de la corrosión, el origen y uso del agua y la naturaleza de las instalaciones.

La planeación de un programa efectivo de control microbiano para un proceso específico de tratamiento de agua requiere un examen de :

- a. Los tipos de organismos presentes en el sistema y los problemas asociados que puedan ocasionar.
- b. La población de cada tipo de organismo que puede ser tolerada antes de que ocasione un problema significativo.

Las bacterias son el grupo más grande de los organismos perjudiciales que ocasionan los más variados problemas. Cada tipo de bacteria tiene su ambiente preferido y se desarrolla en áreas específicas de un sistema.

### **3.10.1 MÉTODOS PARA CONTROLAR LA ACTIVIDAD MICROBIANA.**

Por razones prácticas, en la mayor parte de los sistemas industriales del agua, sólo puede hacerse un uso limitado de las condiciones físicas que afectan la vida microbiana. Por ejemplo, se puede calentar el agua, a temperaturas mayores de las que normalmente las bacterias soportan, para controlar la actividad microbiana, pero si el agua se usa para enfriamiento esto no sería útil. Entre las condiciones químicas que podrían

emplearse para el control de microbios, el candidato más viable es el pH, pero también se encuentra limitado a menos que el agua se pueda mantener a pH mayor de 10.

Ya que ni las condiciones físicas ni las químicas pueden cambiarse en forma práctica para controlar el crecimiento microbiano, los productos químicos deberán emplearse como biocidas. Los dos tipos más comúnmente usados son los oxidantes y los no oxidantes.

**BIOCIDAS OXIDANTES.** El cloro es un agente oxidante fuerte capaz de reaccionar con muchas impurezas en el agua incluyendo amoníaco, aminoácidos, proteínas,  $Fe^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $S^{2-}$  y  $CN^-$ .

El cloro reacciona con el amoníaco para formar tres cloroaminas diferentes, monoclорamina ( $NH_2Cl$ ), dicloramina ( $NHCl_2$ ) y la tricloramina ( $NCl_3$ ); estos compuestos de cloramina tienen también propiedades biocidas y se les conoce como cloro residual combinado. En general, las cloroaminas actúan más lentamente que el cloro residual libre, pero tienen la ventaja de ser más efectivas a valores de pH mayores de 10.

Los biocidas oxidantes como el cloro, los hipocloritos y los materiales organoclorados matarán rápidamente todos los organismos en el sistema, si este se pone en contacto con los organismos el tiempo suficiente con la dosis necesaria. Sin embargo, los biocidas oxidantes también reaccionan con contaminantes como  $H_2S$ ,  $NH_3$  y otras sustancias orgánicas; esto aumenta la cantidad de cloro necesaria para los propósitos biocidas. Los biocidas oxidantes requieren tratamientos complementarios para mejorar su efectividad.

**BIOCIDAS NO OXIDANTES.** Los biocidas no oxidantes ofrecen una

posibilidad para el control de la actividad microbiana en sistemas que son incompatibles con el cloro o para los sistemas con alto contenido de materia orgánica o amoníaco.

Los biocidas no oxidantes tienen las siguientes características :

1. Actividad independiente del pH.
2. Persistencia.
3. Control de organismos como hongos, bacterias y algas.

Entre los biocidas no oxidantes se encuentran :

- \* Compuestos organosulfurados.
- \* Fenoles clorados.
- \* Biocidas catiónicos (aminas y productos cuaternarios).
- \* Compuestos organometálicos.

### **3.10.2 PROCEDIMIENTO DE CONTROL MICROBIANO.**

En sistemas donde la población de microbios pueden mantenerse dentro de cierto intervalo aceptable de control, y no se requiere esterilización completa, deben correrse con frecuencia análisis microbianos para monitorear. Algunas veces sólo se hacen cuentas totales para obtener niveles globales de población microbiana. Sin embargo, en sistemas como circuitos industriales de agua recirculante de enfriamiento, se requieren de análisis de organismos más específicos. Los cambios en la cuenta de totales siempre indican cambios en hongos, bacterias anaeróbicas, bacterias sulfato reductoras y algas.

### 3.10.3 PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA.

La mayoría de los investigadores que estudian métodos para el control de la corrosión bacteriana están de acuerdo que es mucho más factible prevenirla que erradicarla. Para inhibir la corrosión microbiológica se deben tener en cuenta muchos factores entre los que se encuentran los que a continuación se mencionan :

- \* Uso de un biocida efectivo, tomando en cuenta las condiciones de pH, aireación, temperatura, etc. La concentración y frecuencia de uso de éste depende del tipo de biocida usado.

- \* Mantener limpio el sistema para evitar acumulación de materia extraña que proporcione condiciones excelentes para el desarrollo microbiano.

- \* Recubrimientos protectores y protección catódica.

- \* Uso de inhibidores de incrustaciones y enjuagues periódicos para prevenir la acumulación de sólidos o depósitos en suspensión.

### 3.10.4 SELECCIÓN DEL AMBIENTE.

En un ambiente natural hay una amplia variedad de propiedades corrosivas, la selección y modificación del ambiente para que sea menos corrosivo deberá ser la primera consideración en la prevención de la corrosión microbiológica. Obviamente, la utilización de estos principios permite evitar una severa corrosión cuando una estructura metálica se encuentre en el suelo más que en un ambiente acuoso. Muchas pruebas han sido propuestas para determinar la corrosividad o agresividad de los

suelos, por ejemplo, determinación de la resistividad de los suelos y potencial redox entre las más significativas.

**MODIFICACIÓN DEL AMBIENTE.** La mitigación de la corrosión microbiológica ha tenido efecto por medio de cambios en el ambiente, es decir, pasar de un ambiente corrosivo a uno menos agresivo.

Cuando una estructura metálica se encuentra en un suelo anaeróbico con áreas localizadas de corrosión, esto no se puede evitar, pero es posible hacer condiciones aeróbicas (el aire es el inhibidor más barato de las bacterias sulfato reductoras) alrededor de la estructura. La modificación del ambiente acuoso o del suelo a valores de pH alcalinos o ácidos, se ha demostrado que es una forma efectiva para el control de la bacteria sulfato reductora.

### 3.10.5 INHIBIDORES MICROBIOLÓGICOS.

En ciertos sistemas cerrados (tanques de almacenamiento de aceite, intercambiadores de calor, sistemas de agua de enfriamiento, etc), los inhibidores se han usado con grados variados del control de la corrosión.

Los cromatos se han usado ampliamente como inhibidores de la corrosión, parte de su efectividad probablemente se debe a sus efectos fuertemente inhibidores en la bacteria sulfato reductora.

**RECUBRIMIENTO PROTECTOR.** El aislamiento de la superficie del metal de su ambiente mediante un recubrimiento, es una de las más prácticas y efectivas medidas preventivas, especialmente en

sistemas abiertos donde el ambiente no puede controlarse o donde el uso de inhibidores es costoso e inefectivo. Los recubrimientos resistentes a ataques microbiológicos son los más deseables. Recubrimientos asfálticos han sido muy usados en la protección de estructuras de acero y tuberías. Se ha encontrado que los recubrimientos de cemento Portland aplicados sobre acero son muy efectivos.

**PROTECCIÓN CATÓDICA.** El uso de protección catódica en combinación con una estructura metálica recubierta, es probablemente el método más efectivo para prevenir o disminuir la corrosión en suelos y ambientes acuosos. Booth encontró que para la protección de metales ferrosos, un potencial negativo adicional a  $-0.85V$  de  $-0.10V$  da una protección catódica en acero en presencia de bacterias (Ref 33).



## **CAPÍTULO 4**

### **EL MATERIAL EN ESTUDIO: ACERO**

---

El hierro elemental tiene una importancia industrial que excede a la de cualquier otro elemento. Es muy abundante, ocupa el cuarto lugar entre los elementos más abundantes de la corteza terrestre (después el oxígeno, silicio y aluminio) y es un constituyente esencial de varios cientos de minerales; es fácil de obtener calentando algunos de sus minerales con carbono posee muchas propiedades deseables, especialmente cuando posee impurezas. Por todas estas razones, el hierro es una característica tan distintiva de la civilización, que señala la Edad del Hierro en la cronología arqueológica.

El hierro casi nunca se obtiene en estado puro, puesto que es difícil de obtener y demasiado caro para la mayor parte de las aplicaciones. Además, el hierro impuro, especialmente cuando la impureza específica es el carbono, en cantidades cuidadosamente controladas, conocido como **acero** posee propiedades deseables; así pues los aceros son aleaciones que corresponden a una parte del sistema hierro-carbono.

Ningún otro sistema de aleación tiene la importancia industrial del sistema carbono-hierro. Los aceros son inigualables en cuanto a la diversidad de propiedades que ofrecen al ingeniero.

El acero al carbono es el metal más adecuado, común y barato que se emplea en la industria. Tiene una dualidad excelente que permite muchas operaciones de conformación en frío. El acero también es el material más soldable de todos los materiales comerciales, tiene las dos terceras partes del peso del plomo y es tres veces más pesado que el aluminio.

Las propiedades del hierro en la forma de acero dependen mucho del porcentaje de impurezas que están presentes, del tratamiento en caliente de la muestra, y aun de la forma como se ha trabajado la muestra.

## 4.1 PRODUCCIÓN DE ACERO.

El arrabio o hierro de fundición se produce a partir de el mineral de hierro, piedra caliza y carbón en un alto horno. El arrabio o hierro de fundición producto no refinado del alto horno, contiene aproximadamente 4% de carbono, 2% de silicio, huellas de azufre y hasta un 1% de fósforo y manganeso. El azufre es probablemente la impureza más perjudicial, puesto que hace quebradizo el acero, cuando se le trabaja; su presencia se debe evitar, y es difícil de eliminar en las operaciones de refinación.

La mayor parte del hierro de fundición se refina para obtener **acero**, mediante quemado de las impurezas para dejar cantidades pequeñas y controladas de carbono. La eliminación de impurezas se puede efectuar en un horno básico de oxígeno, en un horno de hogar abierto o en un horno eléctrico. Los procesos de fabricación de acero más conocidos se muestran en la tabla 4.1.

PROCESO	MATERIAS PRIMAS (SUSTANCIAS INVOLUCRADAS EN EL PROCESO)	CARACTERÍSTICAS
Acero básico al oxígeno.	Arrabio fundido, chatarra, oxígeno. (cal)	Se obtiene rápidamente (20 min. en un horno de 200 toneladas), baja inversión, bajo costo de operación.
Acero de hogar abierto básico.	Piedra caliza, arrabio, chatarra, oxígeno.	Menor velocidad (6 a 12 horas según el volumen de inyección de oxígeno), obtención de acero con recubrimiento interno silíceo y contenido de fósforo.
Acero Bessemer	Arrabio, aleaciones con C, Si, Mn. (oxígeno)	Proceso rápido (8 a 10 toneladas en 20 minutos), obtención de acero poco uniforme.
Acero eléctrico	Arrabio de alta calidad y composición bien conocida. (óxido de hierro u oxígeno, cal, arena, espato, elementos de aleación).	Proceso rápido, obtención de acero con composición muy específica de alta calidad.

Tabla 4.1 Producción de acero.

## 4.2 CONSTITUCIÓN Y ESTRUCTURA DEL ACERO.

Aunque los aceros están constituidos fundamentalmente por aleaciones hierro-carbono, no son estos dos elementos los únicos que entran en su composición, sino que siempre se hallan asociados en mayor o menor proporción con otros elementos unos que quedan como impurezas, derivadas de las materias primas, formadas por las adiciones necesarias de los procesos de fabricación y otros adicionados para fines específicos. Como resultado de los métodos de fabricación, se encuentran siempre presentes en el acero los siguientes elementos: carbono, manganeso, fósforo, azufre, silicio y trazas de oxígeno, nitrógeno y aluminio. Frecuentemente se le agregan diversos elementos de aleación tales como níquel, cromo, cobre, molibdeno y vanadio. Como se mencionó anteriormente el más importante de los elementos mencionados que contienen acero es el carbono.

Seguramente usted se pregunta como se encuentran los átomos de carbono en el acero, pues bien, esta es la respuesta: el hierro pasa por dos transformaciones alotrópicas durante el calentamiento o el enfriamiento. Después de la solidificación del hierro (1538°C), el hierro forma una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) llamada **hierro delta** (1390°C). A un temperatura de enfriamiento mayor, el hierro transforma su estructura a una estructura cúbica centrada en las caras (FCC), llamada **gama**; al hierro gama que contiene elementos en solución sólida se le llama **austenita**. Finalmente, el hierro vuelve a transformarse en la estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) a la temperaturas de 910°C; esta estructura se denomina **alfa** o **ferrita**.

Tanto la ferrita como la austenita son soluciones sólidas de átomos intersticiales de carbono en hierro. El carbono se disuelve en solución sólida en el hierro, siendo esta solución del tipo de inserción, es decir, que en el estado sólido los átomos de carbono se intercalan en los espacios existentes entre los átomos de hierro. Debido a que los huecos intersticiales en la red BCC son algo mayores que los huecos en la red FCC, puede acomodarse un mayor número de átomos de carbono en el hierro BCC.

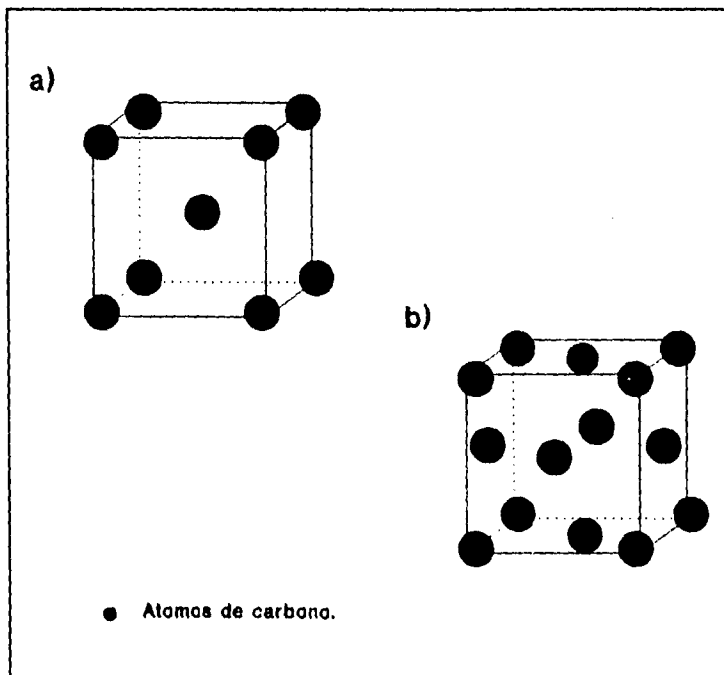


Fig. 4.1 Estructuras cristalinas del acero. a) Cúbica centrada en el cuerpo BCC; b) Cúbica centrada en las caras FCC.

La austenita puede llegar a alcanzar a la temperatura de fusión la dosificación de 2.11% de C mientras que la máxima solubilidad del carbono en el hierro BCC es mucho menor 0.0218% de C en alfa y 0.09% de C en delta. Dosificaciones de carbono mayores a 1.8% hacen inestable la austenita y el carbono en exceso se combina con el fierro formando el compuesto intermetálico  $Fe_3C$  cementita. El  $Fe_3C$  contiene 6.67% de C, es extremadamente duro y frágil y está presente en todos los aceros comerciales. Controlando adecuadamente la cantidad, tamaño y forma del  $Fe_3C$ , se controla el grado de endurecimiento por dispersión<sup>e</sup> y las propiedades del acero.

### 4.3 DIAGRAMA DE FASES DEL ACERO.

El diagrama de fases hierro-carburo de hierro que se muestran, no es un diagrama completo, se muestra hasta composiciones de 6.7% de carbono, la composición de  $Fe_3C$ , o cementita. La parte del diagrama que contiene concentraciones de carbono mayores a 6.7% tiene poca importancia comercial y usualmente se ignora.

El diagrama hierro-carbono se caracteriza por tres puntos invariantes, se llaman puntos críticos (o temperaturas críticas) y, en el diagrama, representan las condiciones o estados de equilibrio: un punto peritético a 0.16% de carbono y 1493°C, un punto eutético a 4.3% de C y 1147°C, y un punto eutectoide a 0.77% de C y 723°C. En la práctica, hay un retraso

---

<sup>e</sup> Incremento de la resistencia mecánica de un material mezclando más de una fase. Mediante un control apropiado del tamaño, forma y propiedades individuales de las fases.

en la obtención de equilibrio, y se encuentran los puntos críticos a temperaturas más bajas que las dadas durante el enfriamiento y más altas durante el calentamiento, aumentando la diferencia con la rapidez de enfriamiento o calentamiento.

Todas las composiciones menores de 2.06% de C pasan a través de la región austenítica durante el enfriamiento desde el estado líquido hasta la temperatura ambiente. Las aleaciones en este intervalo son clasificadas como aceros. En realidad, la mayor parte de los aceros al carbono contienen menos del 1% de carbono; sólo en raras ocasiones se utiliza acero con más de 1%. El acero al carbón en equilibrio a la temperatura ambiente tendrá presentes tanto la **ferrita** como la **cementita**. Las propiedades de la ferrita son aproximadamente las mismas que las del hierro puro. La presencia de la cementita no hace por sí misma que el acero sea duro, sino que más bien es la forma y la distribución de los carburos dentro del hierro. El hecho de que los carburos puedan ser disueltos por la austenita es la base del tratamiento térmico del acero, ya que éste puede ser calentado por encima de la temperatura crítica para disolver todos los carburos, y luego un enfriamiento en forma adecuada a través del margen de temperaturas producirá el tamaño y la distribución deseados de los carburos en la ferrita.

Las composiciones mayores de 2% se clasifican como hierros fundidos o fundiciones. Sin embargo, es necesario recordar que los hierros que se encuentran en el mercado no son simples aleaciones hierro-carbono, sino que poseen pequeñas cantidades de otros elementos como silicio, lo que promueve la formación de grafito. Así pues, una diferencia entre los aceros y los hierros fundidos es la presencia de grafito y cementita en estos últimos, en tanto que los aceros contienen carbono en forma de  $Fe_3C$ .



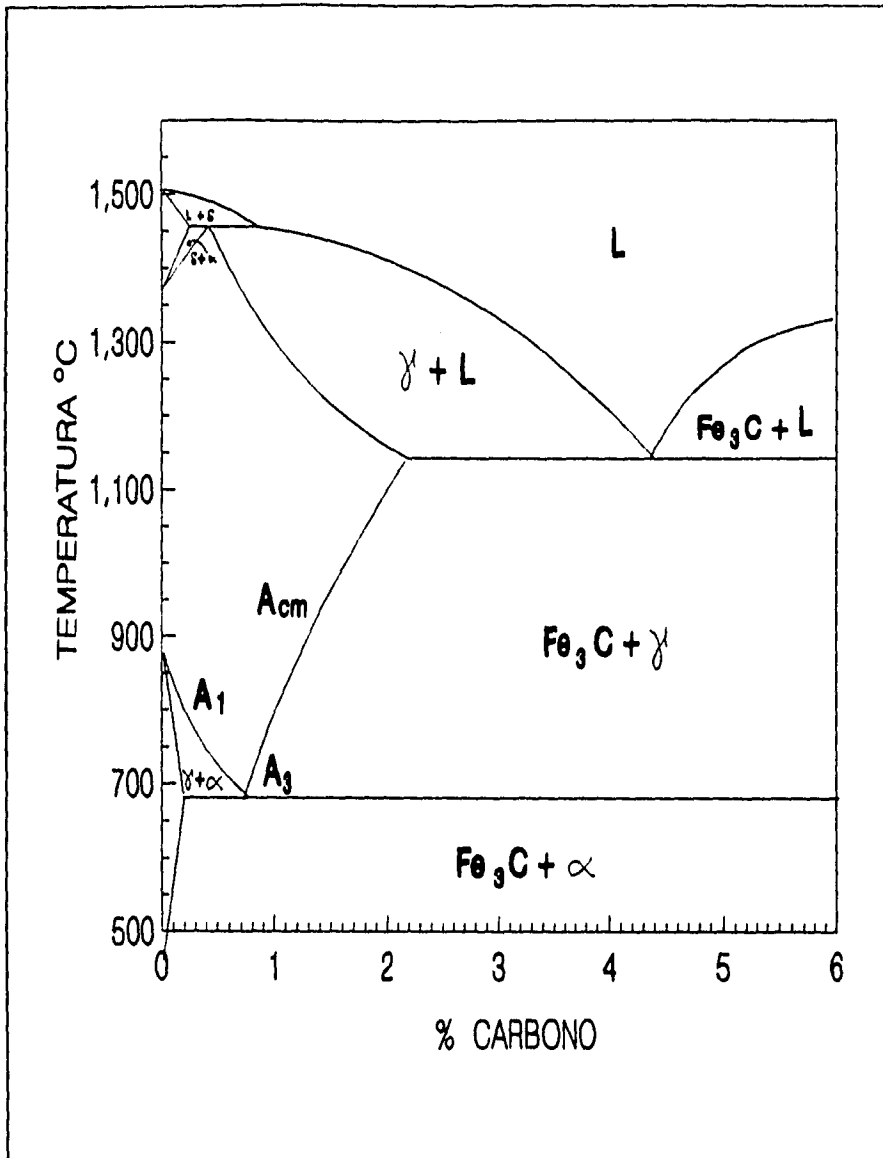


Fig. 4.1 Diagrama de fases del acero.

## 4.4 FASES DE ACERO.

Podemos ahora conocer un poco más de **las fases del acero**.

**FERRITA.** La ferrita es una solución sólida de carbono en hierro alfa con una pequeñísima concentración de aquél, ya que varía de 0.008% a la temperatura ambiente a 0.035% a la temperatura A<sub>1</sub> en el diagrama de fases. Es, pues, hierro alfa casi puro; en la práctica puede contener en disolución elementos como el silicio y el fósforo, que entran en el acero como impurezas, y otros elementos que como el níquel, cromo, cobre, etc., pueden entrar en la composición del acero.

Cristaliza, como hemos dicho, en el sistema cúbico centrado en el cuerpo y sus espacios interatómicos son inferiores a los del hierro gama. Ello es debido en parte a su configuración, pero además a que el parámetro de la red es 2.85 Å en el alfa contiene cuatro átomos de hierro y la alfa sólo dos, el volumen por átomo es mayor en la alfa que en la gama, lo que es causa de que la transformación gama  $\rightarrow$  alfa suponga un considerable aumento de volumen, aun expulsando el carbono que puede haber disuelto el hierro gama.

Es el más blando y dúctil de los constituyentes, pues posee una resistencia de 28Kg/mm<sup>2</sup> y un alargamiento de 35%. Se presenta en los aceros bien como constituyentes proeutectoide en los aceros hipoeutectoides de menos de 0.88% de carbono, bien en mezcla eutectoide con la cementita para formar la perlita.

**CEMENTITA.** La cementita es un carburo de hierro que corresponde a la fórmula Fe<sub>3</sub>C. Contiene, por tanto, 6.67% de carbono y 93.33% de fierro. Es el constituyente más duro y frágil de

los aceros, pues alcanza una dureza de 68 Rc y cristaliza en el sistema ortorrómbico. Es magnética a temperatura ambiente, pero pierde en magnetismo a 218°.

**AUSTENITA.** La austenita es una solución sólida de carbono en hierro gama cuya concentración límite puede variar de 1.8% a la temperatura de 1.130°, a 0.88 a la temperatura  $A_1$  en el diagrama de fases. Sólo es estable a temperaturas superiores a  $A_1$  y en su enfriamiento se descompone en ferrita y cementita.

Su resistencia varía con el carbono disuelto y varía aproximadamente (retenida a la temperatura ambiente por tratamientos adecuados) de 88 a 105 Kg/mm<sup>2</sup>, siendo su alargamiento de 23 a 20 %. es, pues, bastante resistente, dúctil y tenaz, siendo muy elevada su resistencia al desgaste aun con durezas poco considerables. No es magnética y es el constituyente más denso de los aceros, por la capacidad de la red del hierro gama y su menor volumen por átomos de carbono. Es muy difícil retenerla a la temperatura ambiente en los aceros al carbono, pero se logra fácilmente en algunos aceros aleados.

**La perlita y la ledeburita** no son fases, son estructuras o constituyentes del acero.

**Perlita.** Aunque la perlita no es una fase, sino una mezcla de fases (mezcla eutectoide de cementita y ferrita) la perlita es un constituyente por que tiene una apariencia definida tipo huella dactilar bajo el microscopio y puede ser claramente identificada. Contiene 0.77% de carbono, se forma alrededor de 723°C a un enfriamiento muy lento. Es una mezcla muy fina tipo placa laminar de ferrita y cementita. Las propiedades promedio de la perlita son: 120 000 lb/in<sup>2</sup>, resistencia tensil; 20% de elongación, en 2 pulgadas; dureza 20RC.

Ledeburita es la mezcla eutéctica de austenita cementita; contiene 4.3% de carbono y se forma a 1147°C.

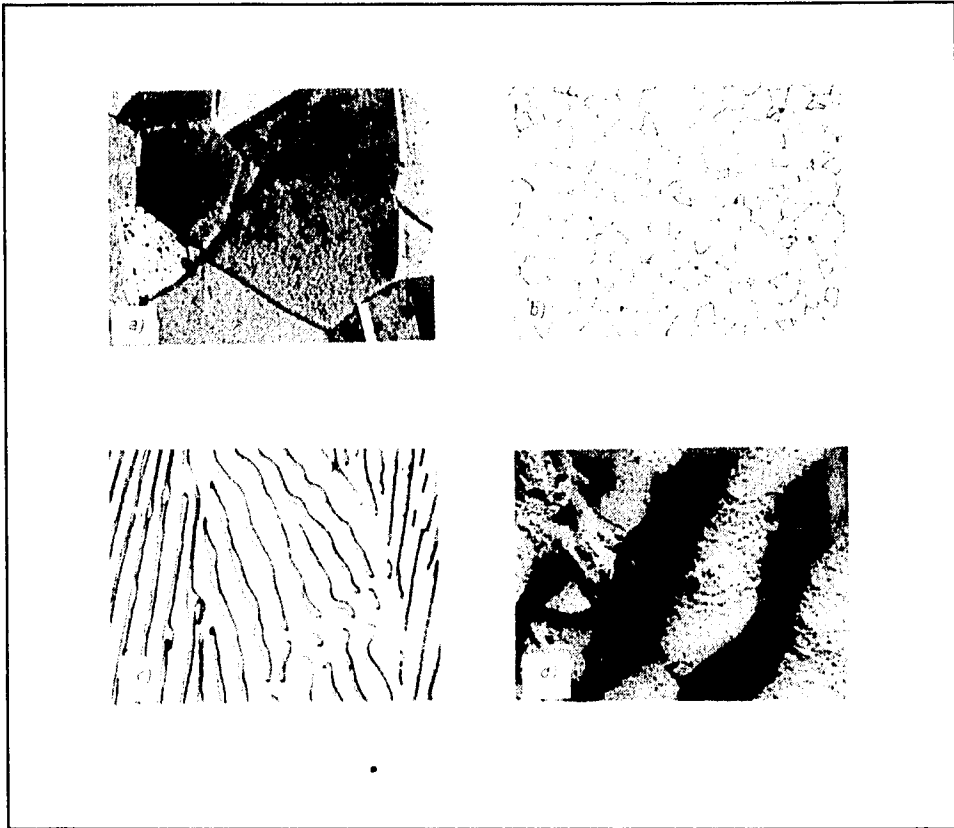
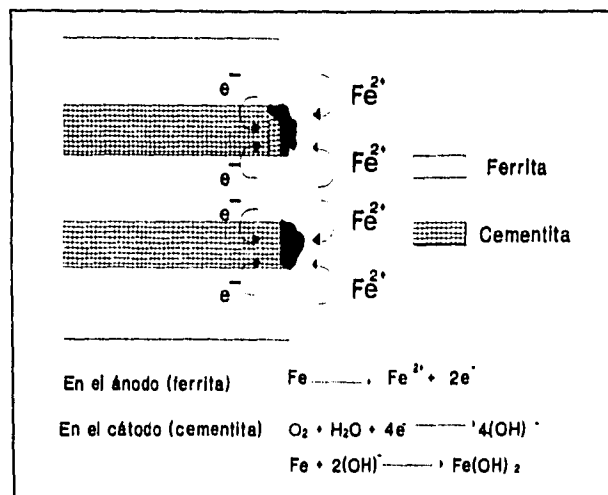


Fig. 4.3 Microestructura del acero. a) Austenita 500X; b) Ferrita 100X; c) Perlita 2500X; d) Perlita 17000X. (a, b y c, Avner H.S. Introducción a la Metalurgia Física)

## 4.5 RELACIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL ACERO CON NUESTRO ESTUDIO.

Las celdas por composición se desarrollan en aleaciones de dos fases, donde una fase es más anódica que otra. Ya que la ferrita es anódica respecto a la cementita en el acero, las microceldas provocan que el acero se corroa galvánicamente.



**Fig. 4.4** Celdas microgalvánicas en el acero. La ferrita es anódica respecto a la cementita.

Por otra parte las celdas por esfuerzo resultan cuando un metal contiene regiones con diferentes esfuerzos locales. Las regiones más altamente esforzadas, o de mayor energía, actúan como ánodos respecto a las áreas catódicas menos esforzadas.

Las regiones con un tamaño más fino de grano, o con límites de grano de mayor densidad, son anódicas respecto a las regiones del mismo material con un grano más grueso. Las áreas con más alto trabajo en frío son anódicas respecto a las áreas con menor trabajo en frío. Los altos esfuerzos aplicados aceleran la corrosión.

## 4.6 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS.

Para clasificar el acero se pueden emplear varios métodos :

- 1) **Método de manufactura.** Este da lugar, al acero Bessemer, de hogar abierto, de horno abierto, de horno eléctrico, de crisol, etc.
- 2) **Uso.** Generalmente se refiere al uso final que se le dará al acero, como acero para máquinas, para resortes, para calderas, estructural o acero para herramientas.

La variedad de aplicaciones para fines de ingeniería se debe al amplio intervalo de propiedades físicas que puede obtener por cambios en el contenido de carbono y en el tratamiento térmico. Las aplicaciones muestran en la tabla 4.2.

- 3) **De acuerdo a su contenido de carbono** los aceros al carbono pueden subdividirse de manera general en tres grupos:
  - a) De bajo contenido de carbono, 0.5 a 0.25% de carbono, en los que se requiere una resistencia moderada unida a una plasticidad considerada.
  - b) Aceros para maquinaria, 0.30 a 0.55% de carbono, los

cuales pueden tratarse térmicamente para desarrollar alta resistencia.

- c) Aceros para herramientas con 0.60 a 1.30% de carbono, que pueden tratarse térmicamente para desarrollar alta resistencia; este último grupo que comprende también los aceros para rieles y para resortes.
- 4) **Composición química.** Este método indica, por medio de un sistema numérico, el contenido aproximado de los elementos importantes en el acero. Es el método de clasificación más conocido.

El **American Iron and Steel Institute (A.I.S.I.)**, ha establecido un sistema normalizado para la designación de estos aceros de acuerdo a su composición química. Para cada acero se usa una cantidad de cuatro o cinco dígitos. Los primeros dos números se refieren a los elementos de aleación más importantes y los dos tres últimos números indican al porcentaje de carbono. Un acero A.I.S.I. 1040 es un acero con 0.40% de carbono, sin otros elementos aleantes. Un acero A.I.S.I. 4340 tiene 0.40% de carbono, el 43 indica la presencia de elementos aleantes. De este modo, el primero de los cuatro dígitos es 1 indica un acero al carbono, 2 un acero al níquel, 3 un acero níquel-cromo, etc. En los casos de acero de aleación simple, el segundo dígito indica el porcentaje aproximado del elemento predominante en la aleación. Los dos o tres últimos dígitos indican el contenido de carbono medio dividido entre 100.

El **American Iron and Steel Institute (A.I.S.I.)**, aunque no es un cuerpo redactor de normas y rectificaciones, colabora con los cuerpos normadores y redactores de especificaciones para su establecimiento. Los ingenieros metalúrgicos que

emplean los aceros participan al prestar sus servicios en comités de cuerpos que promulgan normas y especificaciones de los clientes. Entre estas últimas se incluyen normas y especificaciones de compradores individuales, industrias consumidoras, cuerpos de normalización y cuerpos redactores de especificaciones, incluyendo el gobierno de Estados Unidos.

Los resultados de esa participación se identifican, por lo común, mediante el nombre del cuerpo o la rama de gobierno: "Especificaciones estándar A.S.T.M.", "Especificaciones A.S.M.E.", "Normas S.A.E.", "Especificaciones A.A.R.", "American National Standard", "Especificaciones militares" y "Especificaciones federales". En el manual A.I.S.I. se presentan los aspectos técnicos de las normas y las especificaciones.

En algunas secciones del manual A.I.S.I., ciertos grados numerados de acero se identifican como "Aceros estándares, A.I.S.I.", se trata de normas que abarcan sólo las gamas de composiciones químicas y los límites de esos grados. El historial de esos números de grados se puede seguir de los esfuerzos de normalización de la Automobile Manufacturers Association, en 1900, hasta los trabajos que se realizan actualmente la Society of Automotive Engineers y el instituto (A.I.S.I.). Otros cuerpos han contribuido con información sobre las propiedades y los usos de productos de acero que sirvió como ayuda para el establecimiento de grados numerados como normas. Entre otros han participado en al evolución de aceros normalizados de la A.I.S.I., los clientes individuales, consumidores y los ingenieros con consejos y recomendaciones.



PORCENTAJE DE C	APLICACIONES
0.05-0.10	Lámina, tira, tubos, clavos de alambre o puntas de París.
0.10-0.20	Remaches, tornillos, partes para cementarse o templarse superficialmente.
0.20-0.35	Acero estructural, placa o palastro, piezas forjadas tales como eje de levas.
0.35-0.45	Acero de maquinaria (árboles, ejes, etc.)
0.45-0.55	Piezas grandes de forja (cigüeñales, engranajes para trabajo pesado).
0.60-0.70	Matrices para cabezas de pernos y para estampación; rieles tornillos, picos, sierras de cinta.
0.70-0.80	Matrices y punzones de corte para preparar discos base, barrenas p perforadores para roca, cinceles de mano.
0.80-0.90	Resortes, escariadores, brochaladoras, punzones pequeños y matrices o dados.
1.00-1.10	Resortes pequeños, herramientas para torno, cepilladora, limadora y ranuradora o mortajadora.
1.10-1.20	Brocas, dado para cortar rosca o cojinetes de terraja.
1.20-1.30	Limas, asientos o jaulas para bolas, hojas de afeitar.

**Tabla 4.2** Clasificación del acero por su uso.

## 4.7 ESPECIFICACIONES DE ALGUNOS ACEROS A.I.S.I.

El acero que utilizamos para realizar el presente estudio fue **acero AISI 1010**, por dos razones, debido a que es uno de los más utilizados en la industria petroquímica y a que su bajo

contenido de carbono facilita el estudio de corrosión en un tiempo menor.

En esta sección se muestran algunos números básicos para la serie de cuatro dígitos de los diversos grados de acero al carbono y de aleación con porcentajes aproximados de elementos de identificación, incluyendo el acero A.I.S.I 1010 y el acero A.I.S.I. 316, que se utilizaron en el desarrollo de este trabajo.

NUMERO A.I.S.I.	IDENTIFICACIÓN DEL ACERO
1010	Acero al carbón básico de hogar abierto y bessemer ácidos.
1110	Acero al carbono: básicos de hogar abierto y bessemer ácidos, azufre alto, fósforo bajo.
1210	Aceros al carbono: básicos de hogar abierto, azufre alto, fósforo alto.
1310	Manganeso 1.75.
4010	Molibdeno 0.20 ó 0.25
4110	Cromo 0.50, 0.80 ó 0.95 y molibdeno 0.12, 0.20, ó 0.30.
4310	Níquel 1.83, cromo 0.50 ó 0.80 y molibdeno 0.25.
4410	Molibdeno 0.53.
4610	Níquel 0.85 ó 1.83 y molibdeno 0.20 ó 0.25.
4710	Níquel 1.05, cromo 0.45 y molibdeno 0.20 ó 0.35.
4810	Níquel 3.50 y molibdeno 0.25.
5010	Cromo 0.40
5110	Cromo 0.80, 0.88, 0.93 0.95 ó 1.00. níquel 0.45, cromo 0.40, molibdeno 0.12 y boro 0.0005 mínimo.

**Tabla 4.3** Factores de identificación de algunos aceros.

NUM. A.I.S.I	% C	% Mn	% Pmax	% Smax	NUM SAE
<b>ACEROS AL CARBONO</b>					
1010	0.08-0.13	0.30-0.60	0.04	0.05	1010
1015	0.13-0.18	0.30-0.60	0.04	0.05	1015
1020	0.18-0.23	0.30-0.60	0.04	0.05	1020
1025	0.22-0.28	0.30-0.60	0.04	0.05	1025
1030	0.28-0.34	0.60-0.90	0.04	0.05	1030
1035	0.32-0.38	0.60-0.90	0.04	0.05	1035
1040	0.37-0.44	0.60-0.90	0.04	0.05	1040
1045	0.43-0.50	0.60-0.90	0.04	0.05	1045
1050	0.48-0.55	0.60-0.90	0.04	0.05	1050
1055	0.50-0.60	0.60-0.90	0.04	0.05	1055
1060	0.55-0.65	0.60-0.90	0.04	0.05	1060
1065	0.60-0.70	0.60-0.90	0.04	0.05	1065
1070	0.65-0.75	0.60-0.90	0.04	0.05	1070
1074	0.70-0.80	0.50-0.80	0.04	0.05	1074
1080	0.75-0.88	0.60-0.90	0.04	0.05	1080
1085	0.80-0.93	0.70-1.00	0.04	0.05	1085
1090	0.85-0.98	0.60-0.90	0.04	0.05	1090
1095	0.90-1.03	0.30-0.50	0.04	0.05	1095

**Tabla 4.4** Algunas especificaciones de acero estándar representativo.

FACTOR DE SELECCIÓN		ACERO A.I.S.I. 1010
COMPOSICIÓN QUÍMICA NOMINAL	Carbón	0.08-0.13%
	Manganeso	0.025-0.60%
	Fósforo	0.040% máx
	Azufre	0.050% máx
	Silicio	-----
ATRIBUTOS DE TRATAMIENTO	Maquinación	pobre
	Ductibilidad	excelente
	Maleabilidad	excelente
	Templado	no requerido
	Temple	no requerido
	Carburización	no recomendable
	Cianuración	buena
	Soldadura	excelente
Enchapado	muy buena	

Tabla 4.5 Factores de selección. Acero A.I.S.I. 1010.

FACTOR DE SELECCIÓN		ACERO A.I.S.I. 316
COMPOSICIÓN QUÍMICA NOMINAL	Carbón	0.08% máx
	Manganeso	2.00% máx
	Silicio	1.00% máx
	Cromo	16.00-18.00%
	Níquel	10.00-14.00%
	Molibdeno	2.00-3.00%

Tabla 4.6 Factores de especificación. Acero A.I.S.I. 316.

**CAPÍTULO 5**  
**DESARROLLO EXPERIMENTAL**

---

## 5.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la evaluación de la corrosión microbiológica en los ambientes aerobio y anaerobio se realizaron varios experimentos para medio aerobio y medio anaerobio. En cada uno de los experimentos se trabajó con cuatro celdas, tres celdas con microorganismo y una celda sin microorganismo (Celda control). En todos los casos se trabajó en condiciones ambientales. Más adelante se describirá cada una de estas pruebas.

Cada una de las celdas de corrosión diseñadas para el presente estudio tienen las siguientes características :

- \* Cuatro electrodos de trabajo: Barras de acero A.I.S.I 1010 (Apéndice 1A).
- \* Un electrodo de referencia: Electrodo saturado de Calomel.
- \* Un electrodo auxiliar: Barra de grafito de 0.8 cm de diámetro y 10 cm de longitud.
- \* Un electrodo para medir el pH: Se sustituyó el electrodo de vidrio por una barra de acero inoxidable A.I.S.I. 316 (Ref. 25) (Apéndice 1A).
- \* Un termómetro convencional.
- \* Un tubo nefelométrico.
- \* Dos agujas de jeringa de 5cm de longitud.
- \* Medios de cultivo específicos para bacterias aerobias y anaerobias.
- \* *Pseudomonas aeruginosa* (bacterias aerobias) y un cultivo no axénico de *Desulfovibrio desulfuricans* (bacterias anaerobias).

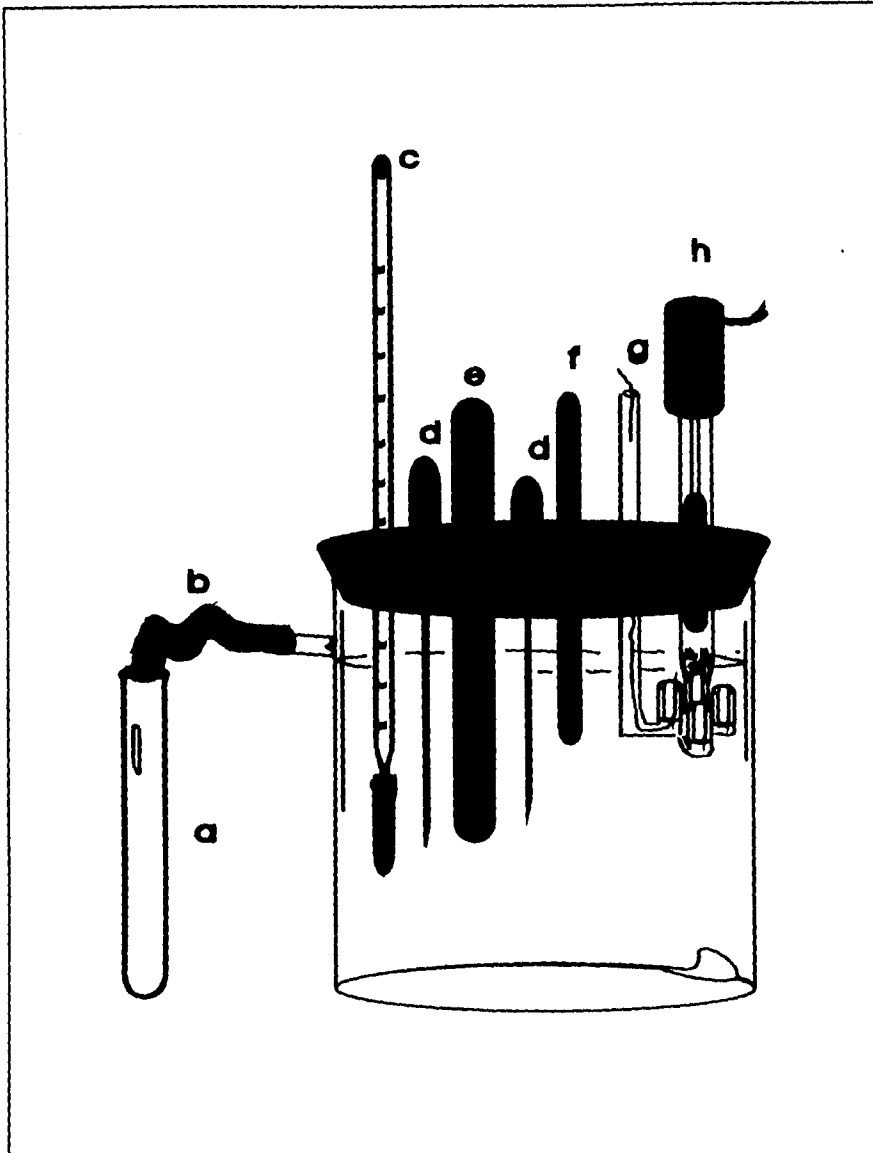
- \* Vaso de precipitados de 500 ml recortado y modificado con una boquilla lateral.
- \* Tapón de goma.
- \* Tubo látex de 15 cm de longitud.

En las figuras 5.1 y 5.2 se observan los esquemas de las celdas de corrosión en los ambientes aerobio y anaerobio respectivamente.

Todos los experimentos duraron 36 días, durante los cuales se realizaron las lecturas y pruebas que a continuación se mencionan :

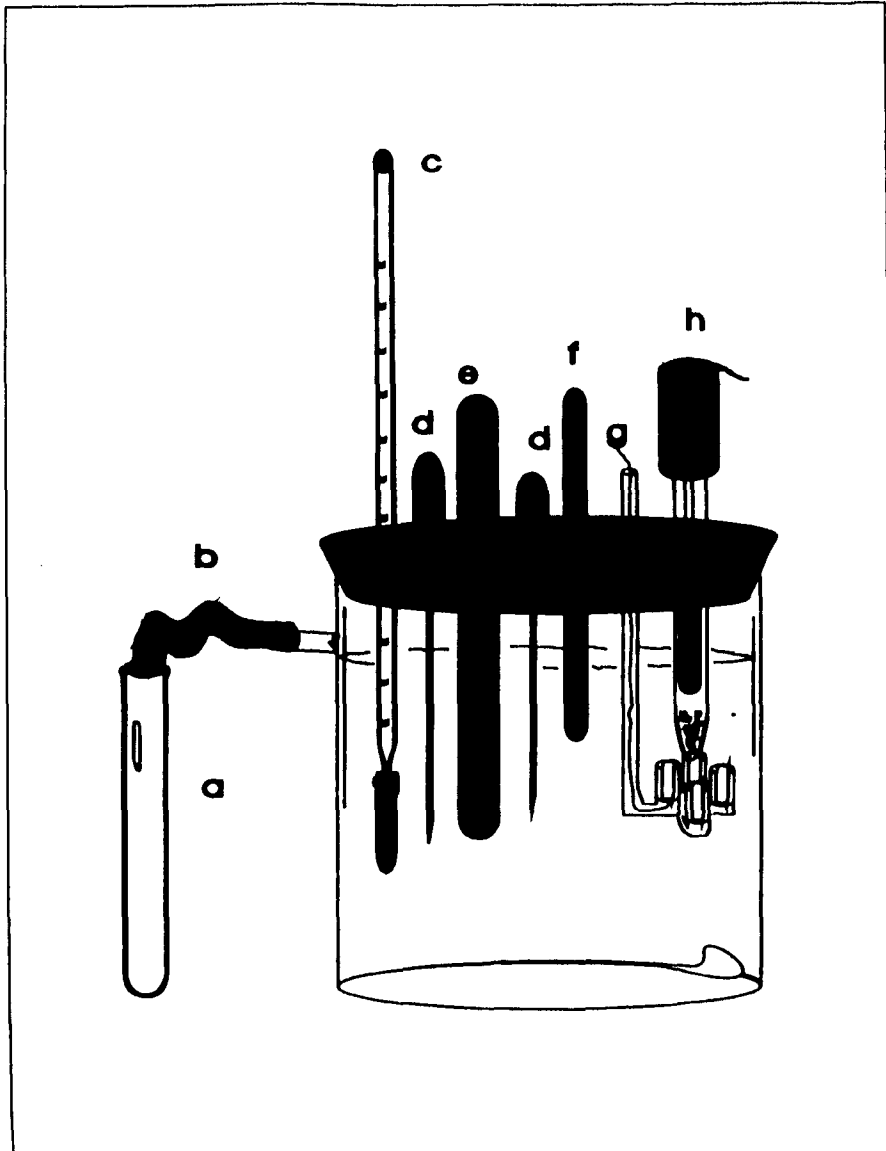
1. pH y Temperatura.
2. Corriente y Potencial, mediante las técnicas de Resistencia a la Polarización y Pendientes de Tafel.
3. Pruebas microbiológicas para determinar la curva de crecimiento y la actividad de las bacterias.
4. Prueba de microscopía electrónica de las piezas de acero A.I.S.I. 1010 para cada una de las pruebas.

Cada una de estas pruebas se realizó periódicamente según la tabla 5.1.



**Fig. 5.1** Celda de corrosión aerobia. a) tubo nefelométrico; b) tubo látex; c) termómetro; d) agujas; e) electrodo auxiliar; f) electrodo de acero (pH); g) electrodos de trabajo; h) electrodo de referencia.





**Fig. 5.2** Celda de corrosión anaerobia. a) tubo nefelométrico; b) tubo látex; c) termómetro; d) aguja; e) contraelectrodo; f) electrodo de acero (pH); g) electrodos de trabajo; h) electrodo de referencia.

TIEMPO DE EXPER (DIAS)	LECTURA DE E Y J (RP Y PT)			LECTURA DE pH Y T			LECTURA DE DENSIDAD ÓPTICA (NEFELOMETRÍA)			DETERMINACIÓN DE BACTERIAS VIABLES		
	EX1	EX2	EX3	EX1	EX2	EX3	EX1	EX2	EX3	EX1	EX2	EX3
0	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
5	X	X	X	X	X	X						
7	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
9	X	X		X	X							
10			X			X						
12			X			X						
14	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
16	X	X		X	X		X	X	X			
17			X			X						
19			X			X						
21	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
28			X			X			X			
36	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Tabla 5.1. Calendario de Pruebas.

## 5.2 EXPERIMENTO A.

### **CORROSIÓN INDUCIDA POR *Pseudomonas aeruginosa*.**

Esta prueba consistió en montar cuatro celdas de corrosión en condiciones aerobias (Apéndice 1B), tres de ellas inoculadas con 5ml de una suspensión de 24 horas de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* y una celda control, que contiene únicamente el medio de cultivo específico para este microorganismo (Ref. 24) (Apéndice 2A). La figura 5.1 muestra el esquema de las celdas de corrosión aerobia.

Durante el período de experimentación, se realizaron las pruebas y mediciones mencionadas anteriormente.

## 5.3 EXPERIMENTO B.

### **CORROSIÓN INDUCIDA POR UN CULTIVO NO AXÉNICO DE *Desulfovibrio desulfuricans* EN MEDIO ATCC-MODIFICADO.**

Igual que en el experimento A se montaron cuatro celdas de corrosión pero bajo condiciones anaerobias (Apéndice 1C), tres de ellas inoculadas con 5ml de una suspensión de 24 horas de un cultivo no axénico de *Desulfovibrio desulfuricans* y una celda control, conteniendo solamente medio de cultivo ATCC modificado (Ref. 1) (Apéndice 2B). La figura 5.2 muestra un esquema de las celdas de corrosión anaerobia. Para estas celdas se realizaron las pruebas mencionadas anteriormente.

## 5.4 EXPERIMENTO C.

### **CORROSIÓN INDUCIDA POR UN CULTIVO NO AXÉNICO DE *Desulfovibrio desulfuricans* EN AGUA DE MAR SINTÉTICA.**

La variante de este experimento con el anterior fue ver el efecto de la corrosión inducida por el cultivo no axénico de *Desulfovibrio desulfuricans* con un cambio en el medio de cultivo; en este caso se usó agua de mar sintética con un agente reductor (Ref. 30) (Apéndice 2C).

Igual que en el experimento B se montaron cuatro celdas idénticas, sólo que en este se caso se cubrieron para evitar la luz y de acuerdo con la bibliografía, favorecer el crecimiento de las bacterias sulfato reductoras. Los parámetros medidos fueron los mismos que para los dos casos anteriores.

## 5.5 MEDICIONES DE pH Y TEMPERATURA.

Para realizar las lecturas de pH se sustituyó el electrodo de vidrio por un electrodo de acero A.I.S.I. 316 previamente tratado (apéndice 1A). Las mediciones con este tipo de electrodo se realizaron de la misma forma que con un electrodo de vidrio convencional.

En un pHmetro Coleman metrio III se conectó un electrodo de referencia (electrodo de Calomel) y un electrodo de acero inoxidable A.I.S.I. 316 haciendo la lectura de pH directamente

en la pantalla. Previamente a cada lectura se ajustó el pHmetro con una solución buffer.

Las lecturas de temperatura se realizaron con un termómetro convencional, el cual se encontraba dentro de la celda. Las mediciones de pH y temperatura para cada experimento se realizaron de acuerdo con la tabla 5.1.

## 5.6 MEDICIONES DE CORRIENTE Y POTENCIAL.

Las mediciones de corriente y potencial se realizaron con el objetivo de determinar la rapidez de corrosión del acero A.I.S.I. 1010 en condiciones aerobias y anaerobias, estas lecturas se hicieron por dos técnicas, Resistencia a la Polarización ( $R_p$ ) y Pendientes de Tafel (PT).

En el método de RP la pieza de acero A.I.S.I. 1010 se sometió a una polarización anódica y catódica de 10mV a partir del potencial a circuito abierto ( $E_{oc}$ ), mientras que para el método de PT la pieza se sometió a una polarización anódica y catódica de 200mV. El potencial de reposo es el potencial que se lee en condiciones de equilibrio, es decir cuando no se somete a una polarización al sistema.

Para realizar las lecturas de corriente y potencial con la técnica de  $R_p$  se utilizó un multímetro digital acoplado a un potencióstato Vimar (PG 3EV) (Foto 5.1), los barridos se hicieron a una velocidad de 2mV/min; mientras que con PT se

---

empleó un potenciostato Vimar (PG 3EV) acoplado a una computadora personal (PC), las lecturas se realizaron a una velocidad de barrido de 1 mV/seg (Foto 5.2).

Cada celda de corrosión contaba con cuatro electrodos de trabajo, dos de ellos para realizar los barridos con  $R_p$  y los otros dos con PT, para ambos casos uno de los electrodos se usó para realizar un barrido al inicio y otro al final de la prueba, el otro electrodo se utilizó para realizar los barridos periódicamente los cuales se realizaron según la tabla 5.1. La finalidad de colocar cuatro electrodos en cada celda fue hacer una comparación entre el comportamiento del acero sometido continuamente a una polarización y del que únicamente se somete dos veces durante todo el tiempo de experimentación.

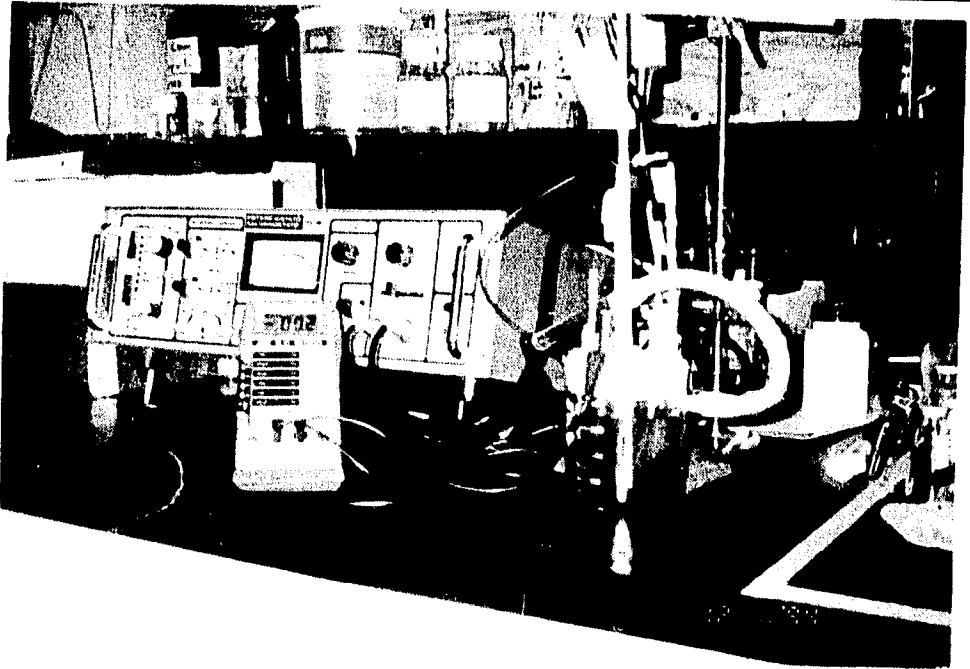


Foto 5.1 Equipo empleado en la técnica de RP.

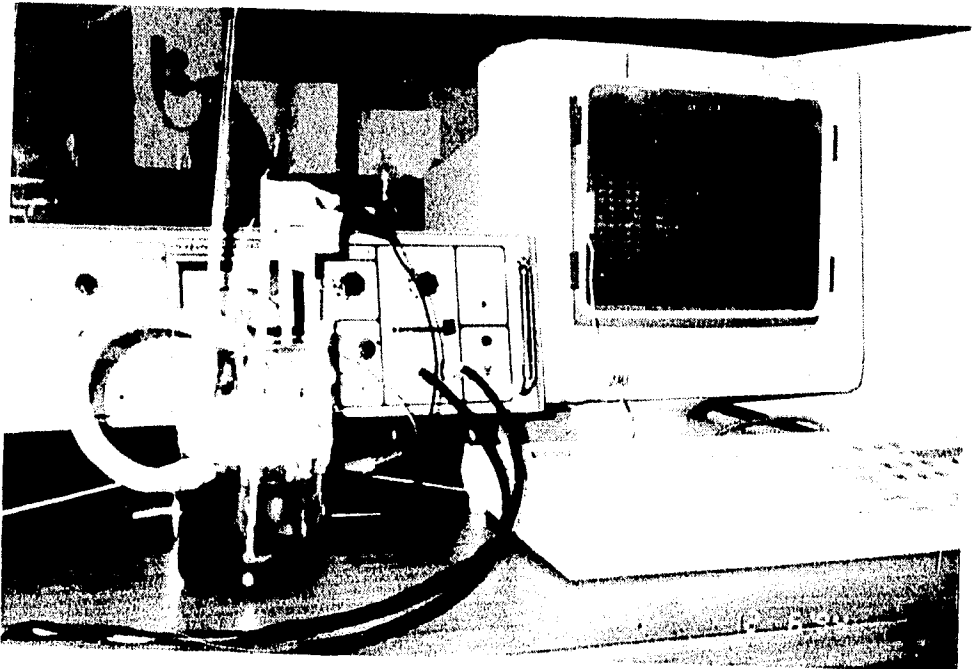


Foto 5.2 Equipo empleado en la técnica de PT.

## 5.7 PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.

### 5.7.1 PRUEBAS DE IDENTIFICACIÓN DE BACTERIAS.

#### a. TINCIÓN DE GRAM.

Esta prueba se realizó para los dos tipos de bacterias, *Pseudomonas aeruginosa* y *Desulfovibrio desulfuricans*, con la finalidad de confirmar la respuesta a la tinción de Gram y las características morfológicas así como conocer la pureza del cultivo.

#### b. PRUEBAS BIOQUÍMICAS.

Las pruebas bioquímicas se realizaron únicamente para *Pseudomonas aeruginosa* con la finalidad de comparar la actividad metabólica de la cepa ya que se mantuvo en refrigeración durante seis meses, así como su pureza e identidad bioquímica.

Para ello se inocularon una serie de medios diferenciales (Apéndice 3A): Triple Hierro Azúcar (TSI), Lisina Hierro Agar (LIA), Citrato de Simmons (CS), Manitol Indol Ornitina (MIO), Sulfuro Indol Motilidad (SIM) y Caldo Úrea (CU), una asada de la cepa, dejándolas en incubación por 24 horas a 28°C, al término de este tiempo se revisó cuál de las pruebas dió positiva para *Pseudomonas aeruginosa* (Foto 5.3).



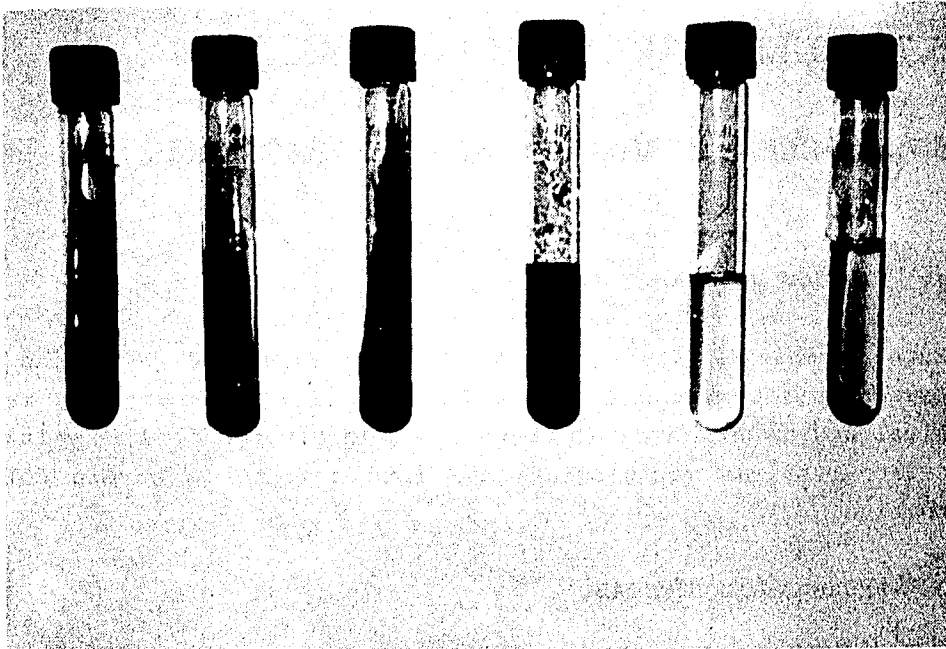


Foto 5.3 Pruebas bioquímicas para *P. aeruginosa*. De izquierda a derecha se tiene: a) TSI, b) LIA, c) CS, d) MIO, e) SIM, f) CU.

## 5.7.2 DETERMINACIÓN DE LA CURVA DE CRECIMIENTO.

### a. NEFELOMETRÍA.

Como consecuencia del crecimiento bacteriano en el medio de cultivo, éste se enturbia. La bacteria *Pseudomonas aeruginosa* en el medio de cultivo que se eligió para este estudio además presenta una pigmentación verde (pioverdina).

Las bacterias sulfato reductoras al reducir sulfatos a sulfuros y con la presencia de hierro en el medio forman un precipitado de color negro (FeS); para el experimento C donde el medio de cultivo es agua de mar sintética no se cuenta con hierro en el medio pero una característica del crecimiento de estas bacterias en agua de mar es la aparición de una opalescencia.

En los tres casos hay un cambio en el aspecto del medio de cultivo por lo que es posible hacer una aproximación de la cantidad de bacterias (vivas y muertas) presentes en cada una de las celdas mediante una lectura nefelométrica periódica (Apéndice 3B) durante los 36 días. La curva de crecimiento se obtiene de graficar el logaritmo del número de bacterias contra el tiempo.

El inconveniente de este método, es que en la lectura de turbiedad interfiere cualquier partícula presente en el medio, es el caso del precipitado de sulfuro de hierro, por lo que se decidió hacer una cuenta de bacterias viables presentes en cada una de las celdas.

#### **b. CUENTA DE BACTERIAS VIABLES.**

La cuenta de bacterias viables para *Pseudomonas aeruginosa* se llevó a cabo en medio de agar-Cetrimida, el cual es un medio selectivo para esta bacteria, esta prueba consistió en realizar varias diluciones del cultivo de las celdas de corrosión con bacteria y sembrar una alícuota de cada dilución en medio agar-Cetrimida, dejándolas en incubación durante 24 horas para posteriormente hacer el conteo de las colonias de cada dilución (Apéndice 3C).

La cuenta de bacterias viables para la mezcla de sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) se realizó en un medio de cultivo selectivo para esta bacteria, el método es básicamente el mismo que el anterior sólo que para este caso se trabajó en condiciones anaerobias (Apéndice 3D).

### 5.7.3 PRUEBAS DE ACTIVIDAD.

Las pruebas de actividad fueron de dos tipos, para la *Pseudomonas aeruginosa* se utilizó una prueba física, esto es, se cuantificó la pérdida de peso que sufrieron 3 piezas de acero A.I.S.I. 1010 al exponerlas al medio de cultivo con y sin bacterias; para el cultivo no axénico de *Desulfovibrio desulfuricans*, además se utilizó una prueba química para dicho fin. El procedimiento utilizado en cada caso se describe a continuación :

Para las pruebas de pérdida de peso se siguió un procedimiento similar al utilizado en la preparación de las muestras para microscopía electrónica (Apéndice 4A). En este caso las piezas se pesaron cuidadosamente antes y después de la exposición al medio corrosivo.

Para las pruebas de actividad para la bacteria anaerobia se inoculó un vial que contenía 20 ml de medio específico conteniendo sulfatos para *Desulfovibrio desulfuricans* (Apéndice 3E) con 3 ml de la mezcla de bacterias sulfato reductoras de cada una de las celdas de estudio. Como el objetivo de esta prueba es seguir el desarrollo del  $H_2S$  producido, se utilizó la técnica yodométrica para cuantificar dicha sustancia a lo largo de 20 días (Apéndice 3E).

## 5.8 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

Esta prueba se realizó para los tres experimentos con la finalidad de observar físicamente los efectos de la corrosión inducida por los microorganismos en estudio, mediante una comparación del aspecto físico del acero antes y después de la exposición a las bacterias y al medio de cultivo sin microorganismos.

La prueba consistió en exponer una pequeña pieza de acero A.I.S.I. 1010, previamente pulida a espejo, en cada uno de los medios de cultivo para cada ambiente y otra en medio de cultivo inoculado con la bacteria respectiva utilizada en cada experimento (Apéndice 4A).

Estas piezas se dejaron en las condiciones utilizadas en cada experimento en un lapso de 36 días, al término de este tiempo se les hizo una limpieza para remover los productos de corrosión (Apéndice 4B) y realizar la prueba final de microscopía.

## **CAPÍTULO 6**

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

---

## 6.1 EXPERIMENTO A.

Este experimento contempla la corrosión en condiciones aerobias del acero A.I.S.I. 1010 inducido por la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* en un medio específico para esta bacteria.

### A.1 pH Y TEMPERATURA.

Durante la experimentación, la temperatura se mantuvo casi constante, alrededor de 18°C, teniendo una temperatura máxima de 21°C en el primer día y una mínima de 17°C en el día 14. Como puede verse en la figura 6.A1, todas las celdas tienen un comportamiento similar.

La variación de pH puede observarse en la figura 6.A2. En ella se aprecia que las celdas 2, 3 y 4 (celdas con *Pseudomonas aeruginosa*), durante los primeros días se presenta un decremento y posteriormente un incremento en zig-zag hasta el día 16, en los siguientes días se observa un crecimiento paulatino, alcanzando un pH máximo de 9.1 para la celda 2 y un mínimo de 8.8 para la celda 3. La celda 1 (celda control), durante los primeros tres días presenta un pequeño decremento llegando a un pH de 6.9, a partir del día cinco éste se incrementa hasta mantenerse en un valor promedio de 7.5.

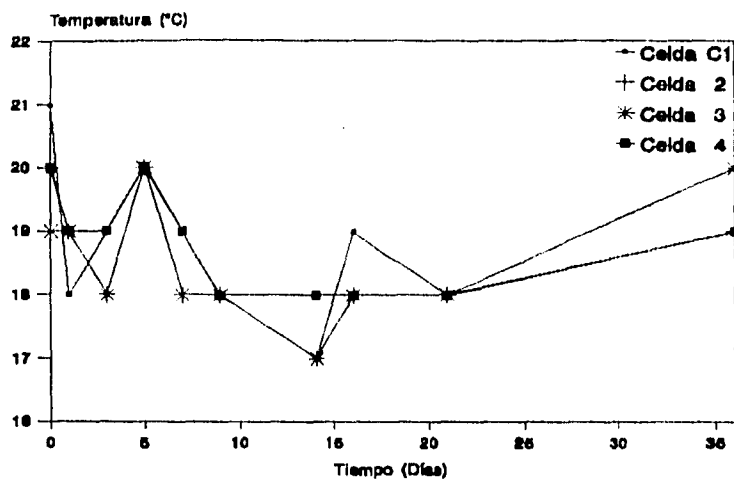


Fig. 6.A1 Temperatura de las celdas.

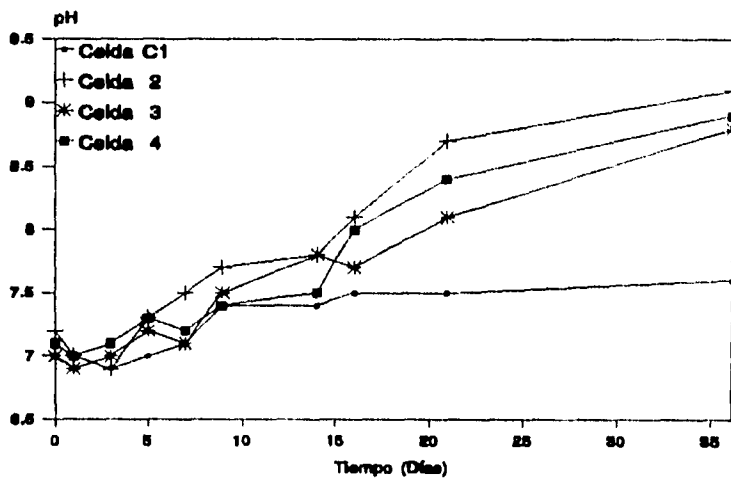


Fig. 6.A2 Variación de pH.

## **A.2 PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.**

### **A.2.1 TINCIÓN DE GRAM.**

Al realizar esta prueba se observó uniformidad en la respuesta a la tinción (rojo) de las bacterias, así como en la morfología de las bacterias presentes en las muestras, ésta fue de pequeños bacilos (bastoncillos). Lo cual nos permite confirmar la pureza del cultivo de *Pseudomonas aeruginosa*.

### **A.2.2 PRUEBAS BIOQUÍMICAS.**

La identificación de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* mediante las pruebas bioquímicas mencionadas en el capítulo 5, dio positiva comparando los resultados con el patrón que presenta esta bacteria coincidiendo con la esperada. Al observar cada bioquímica se encontró que de éstas, únicamente la prueba SIM (Sulfuro [-], Indol [-], Motilidad [+]) presentó un cambio, el cual consistió en la aparición de pigmentación verde (pioverdina) y la presencia de una pequeña capa de bacterias en la superficie del tubo de la prueba bioquímica.

### **A.2.3 CURVA DE CRECIMIENTO.**

El crecimiento de las bacterias *Pseudomonas aeruginosa* puede observarse a simple vista, debido a la turbidez que presentan las celdas con microorganismos. Haciendo una comparación de la



turbidez de las celdas se puede ver cualitativamente cual de ellas es la que presenta mayor población. En la Foto 6.A1 se observa una comparación entre la celda control y una celda con microorganismos, claramente se ve la coloración verdosa de la celda con *Pseudomonas aeruginosa* respecto a la celda control.

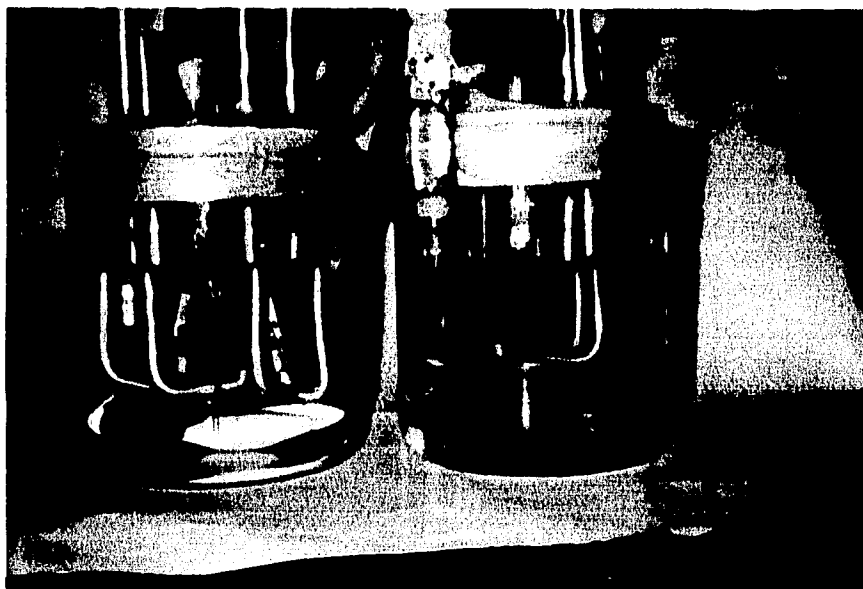


Foto 6.A1 Comparación de la celda control con una celda con *Pseudomonas aeruginosa*.

#### a. NEFELOMETRÍA.

La curva de crecimiento obtenida mediante la técnica nefelométrica se muestra en la figura 6.A3, en ella podemos

observar que el comportamiento de las tres celdas con *Pseudomonas aeruginosa* es en forma exponencial; durante los primeros 15 días el crecimiento es brusco (fase exponencial), posteriormente el crecimiento va en ascenso pero manteniéndose casi constante (fase estacionaria máxima). La celda que presentó un mayor crecimiento fue la número 2 alcanzando  $5.1 \times 10^9$  bacterias/ml y la que presentó menor crecimiento fue la celda 3 alcanzando  $2.6 \times 10^9$  bacterias/ml. Nótese que en la curva de crecimiento se muestran los valores del logaritmo de la concentración bacteriana, por lo que estos valores no corresponden a los que se aprecian en la figura.

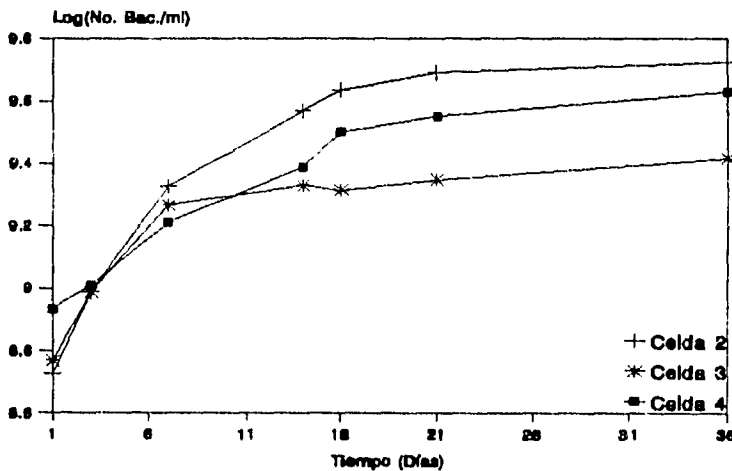


Fig. 6.A3 Curva de Crecimiento (Nefelometría).

#### b. CUENTA DE BACTERIAS VIABLES.

El número de bacterias viables se obtuvo de contar la siembra de la dilución que presentó el menor número de colonias

(siempre y cuando estuvieran entre 30 y 300) y más aisladas, para facilitar el conteo (Capítulo 2); por lo general este conteo se realizó en las dos últimas diluciones, ya que las primeras presentaron una población muy grande y realizar la cuenta en ellas era prácticamente imposible. En la Foto 6.A2 se presenta la apariencia de las colonias de *Pseudomonas aeruginosa* de una dilución intermedia en medio Cetrimida, en ella se observa la coloración verde alrededor de las colonias.



Foto 6.A2 Aspecto de las colonias de *P. aeruginosa* en un medio sólido.

La figura 6.A4 representa la curva de crecimiento de

bacterias viables, esta gráfica, al igual que la curva de crecimiento obtenida por nefelometría, nos muestra un crecimiento brusco durante los primeros siete días (fase exponencial); a partir éste se observa una cantidad de microorganismos casi constante (fase estacionaria máxima), a partir del día 21 disminuye paulatinamente el número de bacterias viables (fase de declinación). La celda que muestra un mayor crecimiento es la número 2 alcanzando un valor máximo de  $134 \times 10^6$  bacterias/ml en el día 14 y terminando la prueba con  $98 \times 10^5$  bacterias/ml, mientras que la celda 3 es la que tuvo menor crecimiento alcanzando un máximo de  $55 \times 10^5$  bacterias/ml en el día 14 y terminando la prueba con  $35 \times 10^4$  bacterias/ml. Esto estuvo de acuerdo con la observaciones hechas, ya que la celda que presentó mayor turbidez fue la celda 2 y la de menor turbidez fue la celda 3. Al igual que en la nefelometría, los valores presentados en la figura corresponden al logaritmo de la concentración bacteriana.

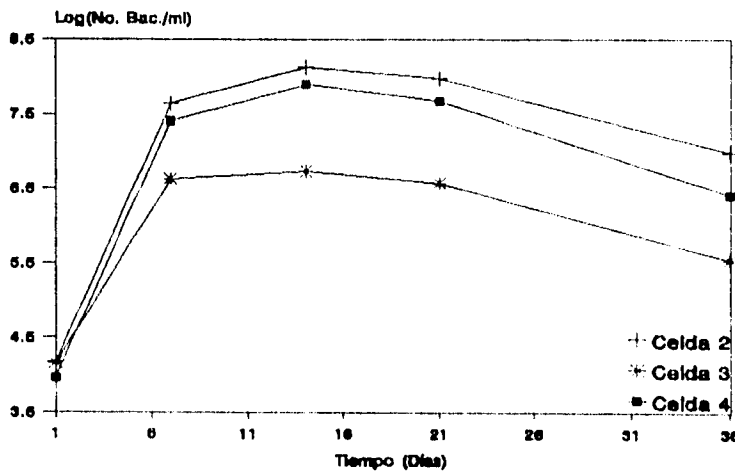


Fig. 6.A4 Curva de Crecimiento  
(Cuenta de Viables).

## A.2.4 PRUEBAS DE ACTIVIDAD.

Las pruebas físicas de actividad consistieron en determinar la pérdida de peso de tres piezas de acero A.I.S.I. 1010, los resultados de estas pruebas se presentan en la tabla 6.A1. En ella se puede ver que la pérdida de peso fue de 0.783% en promedio para las piezas expuestas a *Pseudomonas aeruginosa* y de 0.09% en promedio para las muestras expuestas al medio de cultivo sin microorganismos.

Pieza	Medio de cultivo			Medio de cultivo con <i>Pseudomonas aeruginosa</i>		
	Día 0	Día 36	% pp	Día 0	Día 36	% pp
1	0.5575	0.5569	0.11	0.5724	0.5669	0.96
2	2.1528	2.1513	0.07	2.0285	2.0132	0.75
3	4.3120	4.3078	0.09	4.6462	4.6164	0.64

Tabla 6.A1 Pérdida de Peso (%pp)

## A.3 CORRIENTE Y POTENCIAL.

### A.3.1 PENDIENTES DE TAFEL.

#### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

La variación del potencial a circuito abierto (potencial de reposo, potencial libre de corrosión) respecto al tiempo de los

electrodos, que se sometieron a una polarización al inicio y otra al final, puede verse en la figura 6.A5. Los electrodos de las celdas con *Pseudomonas aeruginosa* 2, 3 y 4 muestran un comportamiento similar entre sí; el potencial crece en forma de campana durante los cinco primeros días, mostrando un valor máximo en el tercer día en todos los casos, a partir del séptimo día toma un valor casi constante; los potenciales finales son ligeramente más catódicos con respecto a los mostrados al inicio. El potencial del electrodo de la celda 1 (control), crece rápidamente durante los primeros siete días y a partir del noveno día se mantiene constante en un valor de -140 mV, siendo este potencial más anódico respecto al de los electrodos de las celdas con microorganismos.

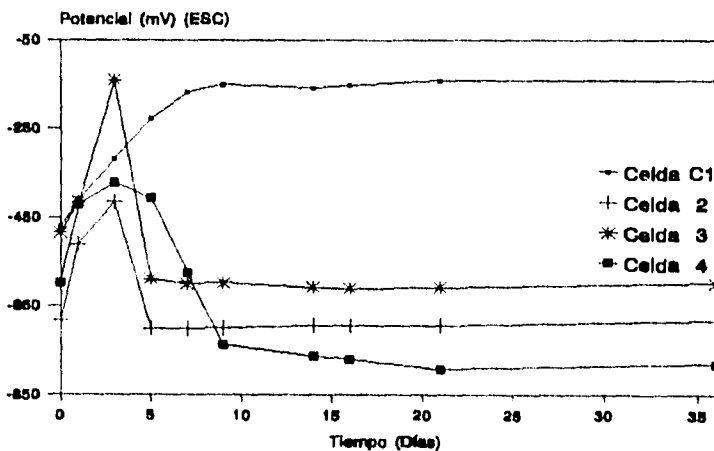


Fig. 6.A5 Potencial a circuito abierto (PT)  
(Inicio-final).

La figura 6.A6 muestra la variación del potencial a circuito abierto de los electrodos, que se sometieron a una polarización periódica. El comportamiento de los electrodos de las celdas con *Pseudomonas aeruginosa* es similar al descrito en el párrafo anterior. El potencial del electrodo de la celda 1 (control), en este caso exhibe un incremento menos pronunciado, al día 14 toma un valor máximo de  $-250$  mV y después decae hasta un valor de  $-360$  mV, este valor resultó más anódico que el de las celdas con microorganismos.

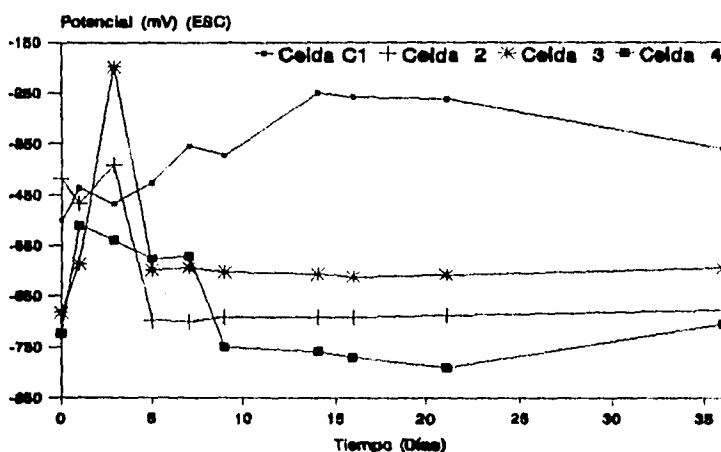


Fig. 6.A6 Potencial a circuito abierto (PT)  
(Periódico).

#### b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.

En la técnica de Pendientes de Tafel la rapidez de corrosión se determina a partir del cálculo de la densidad de corriente de corrosión, para ello se elaboraron las gráficas de polarización contra logaritmo de la densidad de corriente a partir de los

barridos de potencial. En este experimento se obtuvieron 48 gráficas en total (contando electrodos de inicio-final y periódicos de cada celda). Para facilitar la presentación, así como el análisis de los resultados, se muestran las gráficas de los barridos de potencial de los electrodos periódicos de los días 0 y 36 de las celdas 1 (control) y 2 (con *Pseudomonas aeruginosa*) en las figuras 6.A7 y 6.A8 respectivamente. De cada una de las gráficas se obtuvieron, mediante una regresión lineal (mínimos cuadrados), las ecuaciones de las rectas anódica y catódica, estas ecuaciones se igualaron para obtener el valor del logaritmo de la densidad de corriente de corrosión ( $J_{corr}$ ) y de allí calcular la rapidez de corrosión; la ecuación que se utilizó para obtener dicho valor es la siguiente (Ref. 28) :

$$R.C. \text{ (mm/año)} = 3223.413 \frac{J_{corr} * P.E.}{\rho}$$

Donde:

$J_{corr}$  = Densidad de corriente de corrosión en A/cm<sup>2</sup>.

P.E. = Peso equivalente en g\*eq/mol.

$\rho$  = Densidad del material en g/cm<sup>3</sup>.

Para el acero A.I.S.I. 1010 se obtiene la siguiente ecuación:

$$R.C. \text{ (mm/año)} = 11575.2275 J_{corr}$$

Un ejemplo numérico del cálculo de la rapidez de corrosión se puede ver en el apéndice 6A.



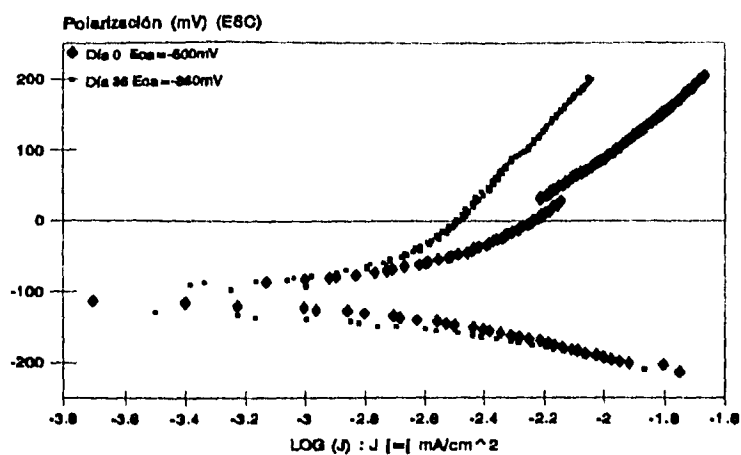


Fig. 6.A7 Pendientes de Tafel  
(Celda C1).

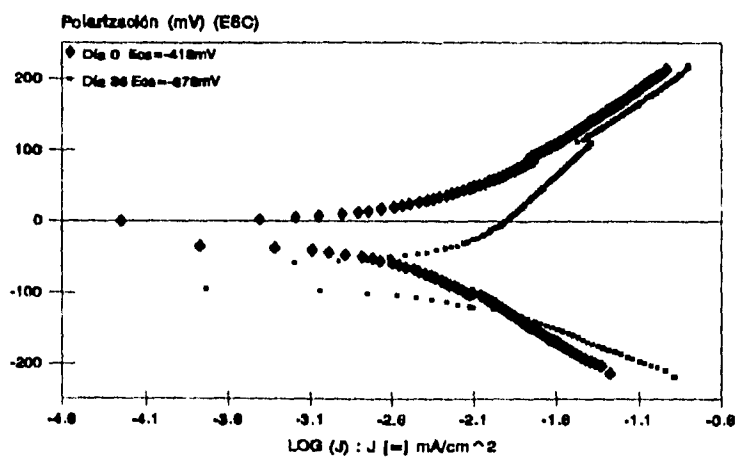


Fig. 6.A8 Pendientes de Tafel  
(Celda 2).

Los valores de rapidez de corrosión de los electrodos sometidos a esta técnica se muestran en la tabla 6.A2.

Tiempo Días	Celda 1		Celda 2		Celda 3		Celda 4	
	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per
0	0.027	0.024	0.022	0.030	0.026	0.030	0.026	0.030
1		0.030		0.040		0.069		0.038
3		0.012		0.059		0.059		0.046
5		0.011		0.067		0.099		0.021
7		0.025		0.072		0.065		0.018
9		0.016		0.073		0.034		0.023
14		0.013		0.058		0.066		0.019
16		0.017		0.062		0.095		0.031
21		0.019		0.036		0.069		0.065
36	0.028	0.019	0.046	0.051	0.018	0.024	0.040	0.041

Donde I-F son los valores de los electrodos inicio-final y Per de los electrodos periódicos.

**Tabla 6.A2** Rapidez de Corrosión (mm/año).

Una representación gráfica de la rapidez de corrosión, se encuentra en la figura 6.A9. En ella se ve que los electrodos de las celdas con *Pseudomonas aeruginosa* 3 y 4, tienen un comportamiento en zig-zag hasta los 21 días, al final de la prueba el valor de ambas disminuye hasta un valor poco mayor al inicial; el comportamiento de la celda 2 es más regular, éste durante los primeros nueve días aumenta hasta un valor máximo de 0.073 mm/año, después hasta el día 21 disminuye para aumentar en el último día del experimento. La rapidez de corrosión de la celda 1 (control), es prácticamente constante (0.02 mm/año en promedio), aunque muestra un decremento en el

valor de la misma al final de la prueba respecto al inicio.

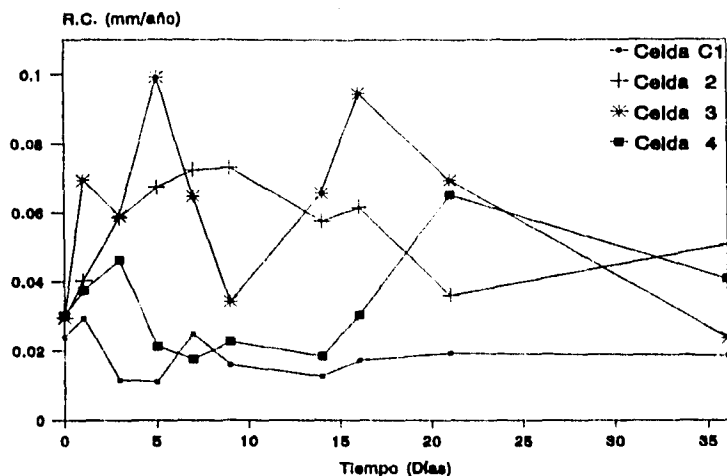


Fig. 6.A9 Rapidez de Corrosión (PT).

### A.3.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.

#### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

La figura 6.A10 muestra la variación del potencial a circuito abierto (potencial libre de corrosión, potencial de reposo, etc.) para los electrodos a los que se les aplicó un barrido de potencial al inicio y otro al final. El comportamiento de estos electrodos en las cuatro celdas es similar, hasta el día tres el potencial se desplaza de manera importante hacia potenciales anódicos, a partir del día cinco los potenciales disminuyen hasta alcanzar valores cercanos al potencial

inicial, manteniéndose casi constantes hasta el final de la prueba. Al término del experimento, el electrodo de la celda 1 (celda control) presentó el potencial más anódico (-550 mV) respecto a las celdas con *Pseudomonas aeruginosa*.

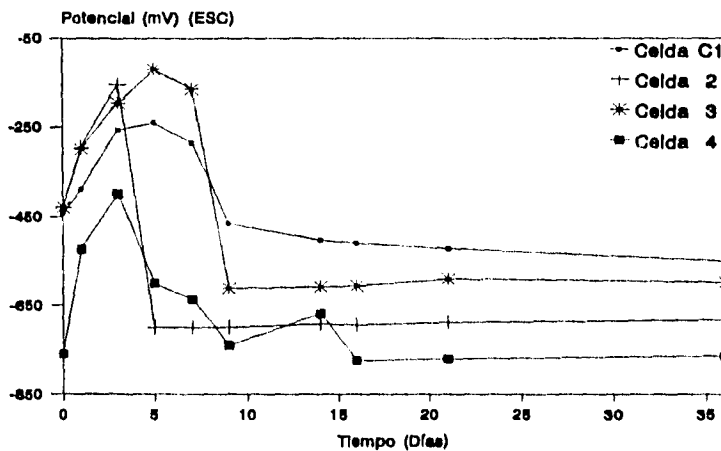


Fig. 6.A10 Potencial a circuito abierto (RP) (Inicio-final).

La figura 6.A11 muestra la variación del potencial a circuito abierto para los electrodos a que se les aplicó un barrido de potencial periódico. El comportamiento de las cuatro celdas es similar al descrito anteriormente. Para este caso cabe destacar que el electrodo de la celda 1 (control) no tiene una caída de potencial tan brusca como la que presentó el electrodo de inicio-final y también éste alcanzó el potencial más anódico respecto a las celdas con microorganismos.

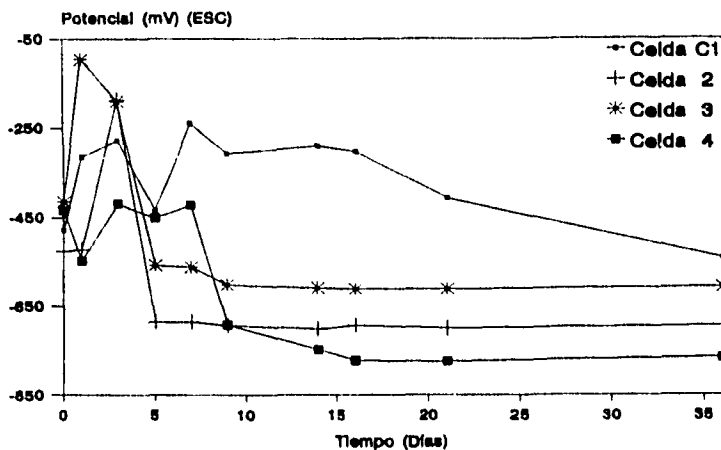


Fig. 6.A11 Potencial a circuito abierto (RP) (Periódico).

#### b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.

Para determinar la rapidez de corrosión mediante la técnica de Resistencia a la Polarización, se realizaron barridos de potencial para después obtener las gráficas de densidad de corriente-potencial. Para este experimento se obtuvieron 48 gráficas en total (contando electrodos de inicio-final y periódicos de cada celda).

Para facilitar el análisis y la presentación de los resultados, se muestran las gráficas de los barridos de los electrodos periódicos de los días 0 y 36 de la prueba de las celdas 1 (control) y 2 (con microorganismos) en las figuras 6.A12 y 6.A13 respectivamente. De cada una de las rectas graficadas se obtuvo su pendiente mediante una regresión lineal (mínimos cuadrados); como se mencionó en el capítulo 1, el

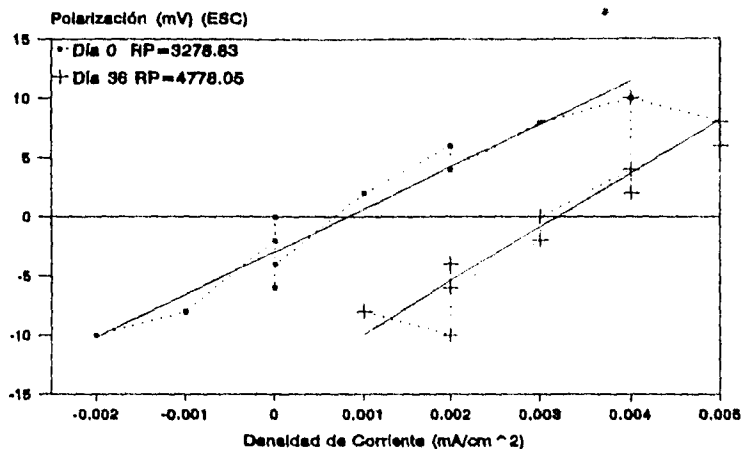


Fig. 6.A12 Resistencia a la Polarización (Celda C1).

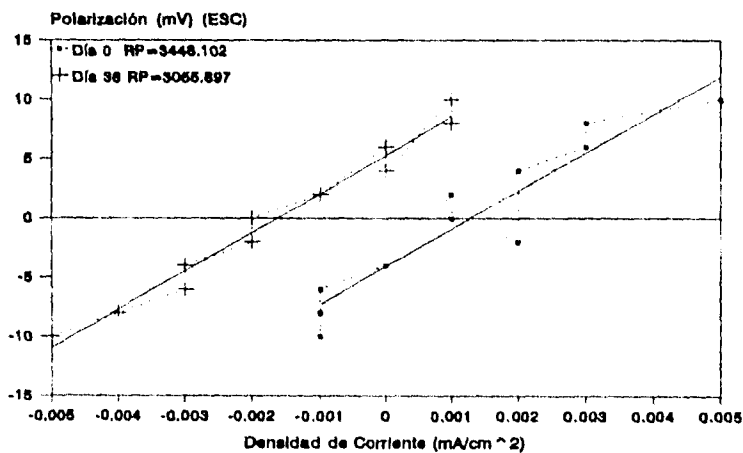


Fig. 6.A13 Resistencia a la Polarización (Celda 2).

valor de la pendiente (RP) se relaciona con la densidad de corriente de corrosión ( $J_{\text{corr}}$ ), mediante la ecuación :

$$RP = \frac{ac}{2.303 (J_{\text{corr}}) (a+c)} = \frac{L}{J_{\text{corr}}}$$

Donde, a y c son las pendientes de Tafel y L engloba los términos constantes de la ecuación anterior. La rapidez de corrosión se obtiene a partir de la ecuación siguiente :

$$R.C. \text{ (mm/año)} = 11575.2275 J_{\text{corr}}$$

Un ejemplo numérico del cálculo de la rapidez de corrosión se puede ver en el apéndice 6B. En la tabla 6.A3 se muestran los valores de rapidez de corrosión obtenidos para cada uno de los electrodos de cada celda, sometidos a RP.

En la figura 6.A14 se representa el comportamiento de la rapidez de corrosión respecto al tiempo de experimentación; en ella se observa que las celdas con *Pseudomonas aeruginosa* 2, 3 y 4 muestran un comportamiento en zig-zag durante los primeros ocho días, posteriormente las celdas 2 y 4 presentan una disminución paulatina de la rapidez de corrosión, tomando un valor mínimo de 0.099 mm/año y 0.137 mm/año respectivamente; mientras que la celda 3 muestra un incremento paulatino hasta el final de la prueba, alcanzando una rapidez de corrosión de 0.175 mm/año. El comportamiento de la celda 1 (control) durante los primeros ocho días presenta una disminución en la rapidez de corrosión para posteriormente incrementarse poco a poco hasta alcanzar un valor de 0.078 mm/año.

Tiempo	Celda 1		Celda 2		Celda 3		Celda 4	
Días	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per
0	0.110	0.102	0.097	0.096	0.180	0.201	0.082	0.092
1		0.118		0.377		0.308		0.229
3		0.090		0.128		0.050		0.254
5		0.103		0.447		0.045		0.108
7		0.092		0.056		0.080		0.392
9		0.053		0.228		0.094		0.291
14		0.070		0.157		0.121		0.172
16		0.079		0.173		0.134		0.291
21		0.088		0.173		0.177		0.272
36	0.191	0.078	0.100	0.100	0.198	0.175	0.156	0.137

Donde I-F son los valores de los electrodos inicio-final y Per de los electrodos periódicos.

Tabla 6.A3 Rapidez de Corrosión (mm/año).

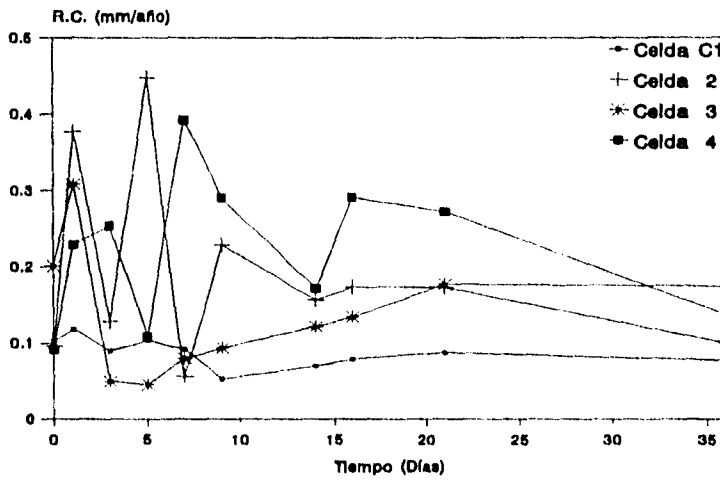


Fig. 6.A14 Rapidez de Corrosión (RP).



## A.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

La Foto 6.A3 presenta la superficie pulida a espejo de una de las muestras de acero A.I.S.I. 1010 antes de la exposición al medio corrosivo, ésta nos muestra una superficie casi uniforme, a excepción de algunas cavidades inherentes a la fabricación del acero.

En la Foto 6.A4 se observa el efecto del medio de cultivo en la pieza de acero, en ella se ve un tipo de corrosión en placas (Ref. 16). El efecto de las bacterias, *Pseudomonas aeruginosa*, sobre la pieza de acero se presenta en la Foto 6.A5, en la que se observa un ataque en forma de picaduras, se puede ver claramente las cavidades de diferentes dimensiones y formas.

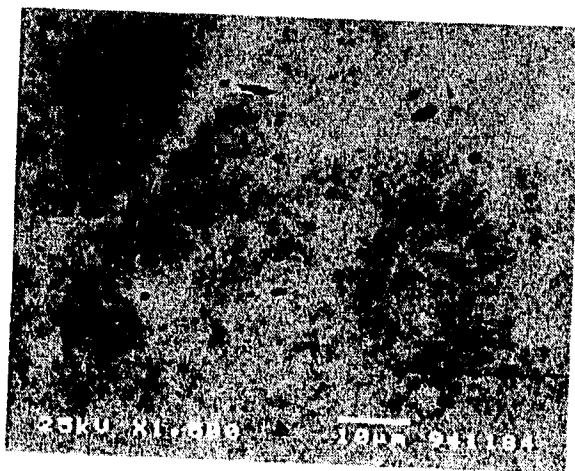
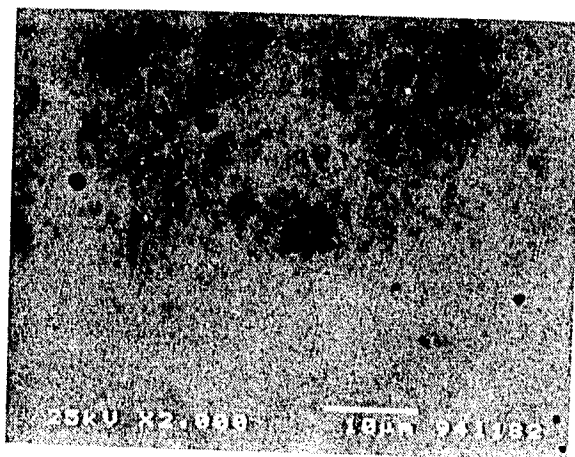
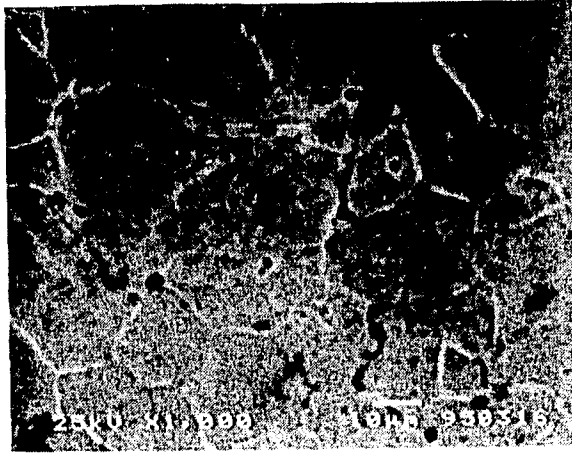


Foto 6.A3 Superficie de los electrodos de trabajo pulidas a espejo.



**Foto 6.A4** Efectos del medio de cultivo sobre la superficie de los electrodos de trabajo.

La Foto 6.A6 muestra un enfoque en donde se puede distinguir una parte de la pieza de acero sin ataque (esquina superior izquierda) y otra parte donde se ve el ataque de la bacteria (esquina inferior derecha).

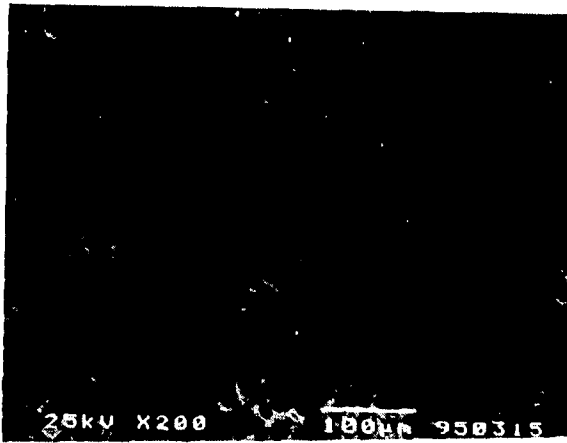


Foto 6.A5 Efecto de la *P. aeruginosa* sobre la superficie del electrodo de trabajo.

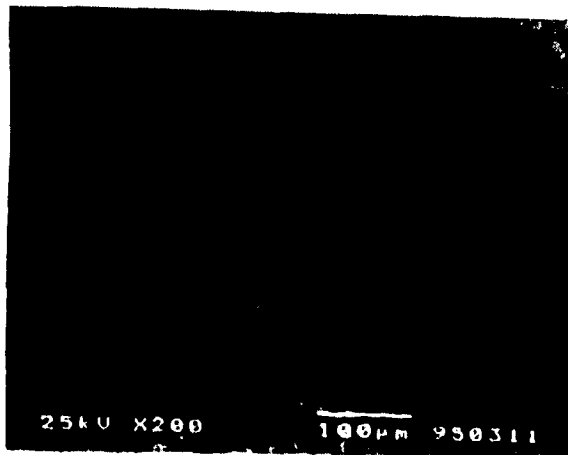


Foto 6.A6 Comparación de una parte del electrodo con corrosión y una libre de ésta.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO A.

### A.I ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS.

Como se mencionó en el capítulo 2, la temperatura es un factor muy importante en el crecimiento de las bacterias, desafortunadamente no se contó con el equipo necesario para mantener la temperatura óptima de crecimiento, pero debido a que la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* es una bacteria muy adaptable al cambio de condiciones ambientales su crecimiento fue satisfactorio, como se puede observar en las curvas de crecimiento, figuras 6.A3 y 6.A4 (nefelometría y cuenta de bacterias viables respectivamente).

Como era de esperarse el número de bacterias por mililitro fue mayor en la curva nefelométrica que en la obtenida por cuenta de bacterias viables; esto se debe a que en las lecturas nefelométricas se leen bacterias vivas y muertas además de cualquier otra partícula suspendida en el medio. Por tal motivo en la curva de crecimiento nefelométrica nunca aparece la fase de declinación.

Los productos del metabolismo de la *Pseudomonas aeruginosa* son básicos ( $\text{NH}_4\text{-R}$ ) (Ref. 23), ésta es una de las causas del notable aumento del pH (Fig. 6.A2); otra de las causas de este aumento puede deberse a la formación de iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) por efecto de la hidrólisis provocada por la hidratación de los iones metálicos (Ref. 16).

La actividad de las bacterias en estudio se mostró en la tabla 6.A1, donde se aprecia claramente el efecto de la bacteria sobre las piezas de acero, ya que la pérdida de peso en las piezas expuestas a *Pseudomonas aeruginosa* fue aproximadamente siete veces mayor que la causada por el medio de cultivo.

## A.II ASPECTOS ELECTROQUÍMICOS.

### A.II.1 PENDIENTES DE TAFEL.

#### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

En general, el comportamiento del potencial a circuito abierto es similar entre los electrodos a los que se les realizaron las lecturas inicio-final y periódicas (Fig. 6.A5 y Fig.6.A6 respectivamente). Los potenciales a circuito abierto adquiridos el día cero difieren entre sí debido a que las superficies de los electrodos no son idénticas, ya que éstas presentan diferencias atribuidas al pulido y a los defectos de fabricación del acero (Foto 6.A3). En las últimas figuras mencionadas se observa que la variación en el potencial hacia valores más anódicos indica un primer ataque del metal y al final de la prueba las celdas con *Pseudomonas aeruginosa* presentaron potenciales menos anódicos que la celda control, debido a la formación de la biopelícula; ésta aunque recubre la superficie del electrodo no presenta características protectoras.

Las variaciones importantes en los potenciales a

circuito abierto se registran durante la fase exponencial de la curva de crecimiento, esto se atribuye a la formación de pequeñas celdas de aireación como resultado de una biopelícula no uniforme.

#### **b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.**

La forma de las curvas, para obtener las pendientes de Tafel, que se obtienen de los electrodos sometidos a los barridos de potencial cambia conforme transcurre el tiempo de experimentación, esto se puede observar en las figuras 6.A7 y 6.A8. Al inicio de la prueba las curvas que se obtienen son de la forma típica de las pendientes de Tafel, éstas se van modificando al paso del tiempo hasta obtener las curvas similares a las del día 36.

Para la celda control la curva que se obtiene al final de la experimentación muestra una pendiente mayor en la recta anódica (Fig. 6.A7), lo que indica que el control en la superficie del electrodo cambió de un proceso mixto a un proceso anódico (Capítulo 1), característico este último, de las superficies recubiertas con una película porosa. En el caso de los electrodos de las celdas con bacterias se mantiene un proceso típicamente mixto, pero con un ligero aumento en las pendientes de las rectas anódica y catódica (Fig. 6.A8).

Las curvas obtenidas de los barridos realizados en los electrodos de inicio-final presentan un comportamiento similar al obtenido en los barridos hechos en los electrodos periódicos. Por lo anterior y aunado a que son demasiadas gráficas no se presentaron en ninguna figura.

Las variaciones importantes en la rapidez de corrosión

obtenida de los electrodos periódicos sometidos a PT se presentaron durante los primeros 15 días debido a una mayor actividad microbiológica para formar la biopelícula (Fig. 6.A9). Una representación gráfica de la variación de rapidez de corrosión (variación del día de medición con respecto a la medición anterior) se muestra en la figura 6.A15, en ella se observa que no hay un comportamiento uniforme entre las celdas porque la concentración bacteriana y la superficie de los electrodos no es la misma.

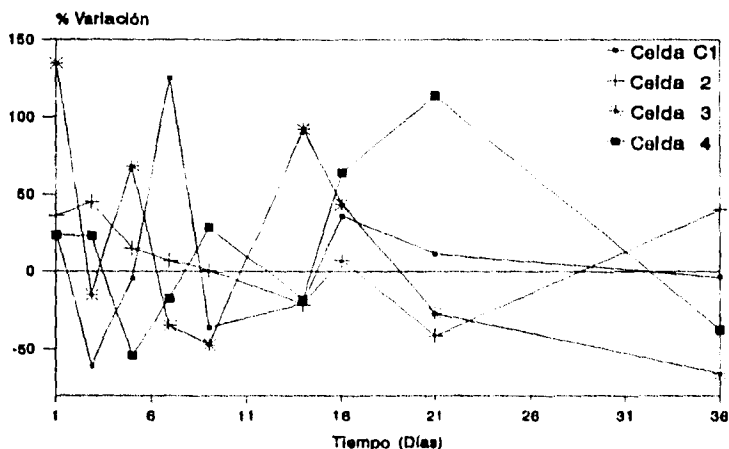
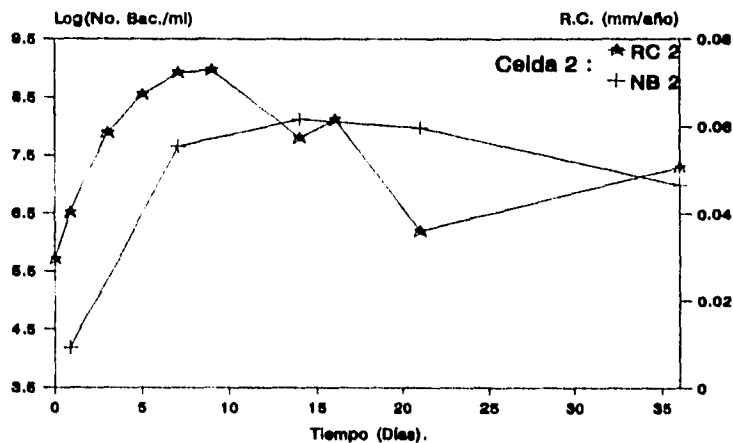


Fig. 6.A15 Variación de la Rapidez de Corrosión (PT).

Podemos relacionar la rapidez de corrosión y el logaritmo del número de bacterias contra el tiempo de experimentación, esta relación se presenta en las figuras 6.A16, 6.A17 y 7.A18 para las celdas con microorganismos 2, 3 y 4 respectivamente.



En los tres casos se observa que la rapidez de corrosión durante la fase exponencial de la curva de crecimiento aumenta, debido a la formación de pequeñas celdas de aireación en el electrodo; hay un período en donde la rapidez de corrosión presenta un decremento, debido a un efecto pasivante al recubrirse la superficie de los electrodos con productos de corrosión, bacterias vivas y muertas presentes en la biopelícula.



**Fig. 6.A16 Curva de Crecimiento (Cuenta de Viables) y Rapidez de Corrosión (PT) vs. Tiempo.**

En la celda 3 que es la que presenta menor número de bacterias (Fig. 6.A17) se observa que el período de pasivación es más retardado en comparación con las celdas 2 y 4, esto se atribuye a que la formación de la biopelícula pasivante es más lenta que en las celdas con un número de bacterias mayor.

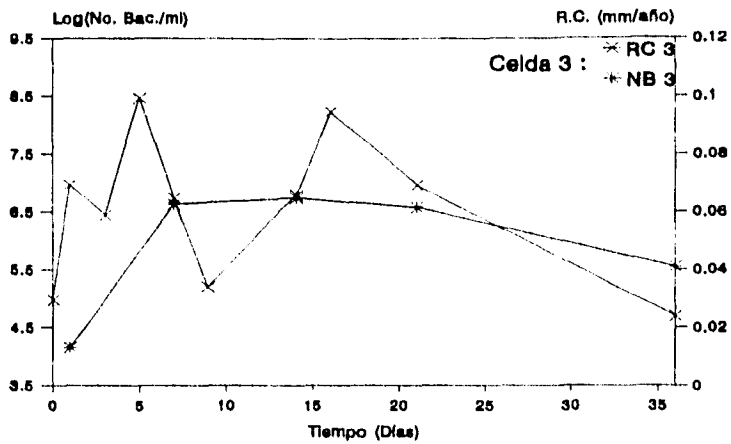


Fig. 6.A17 Curva de Crecimiento (Cuenta de Viabiles) y Rapidez de Corrosión (PT) vs. Tiempo.

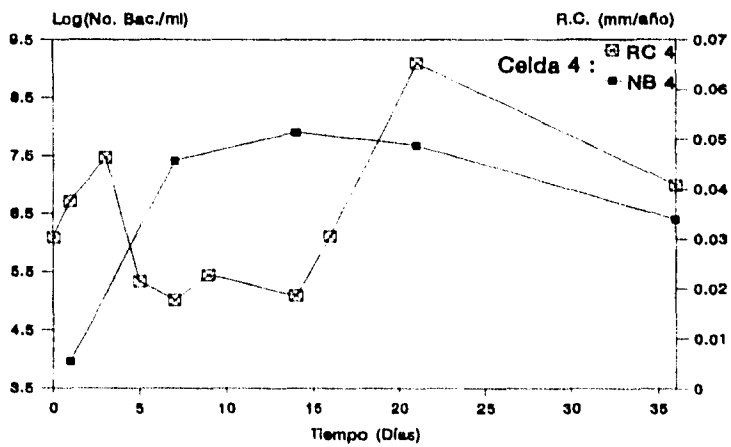


Fig. 6.A18 Curva de Crecimiento (Cuenta de Viabiles) y Rapidez de Corrosión (PT) vs. Tiempo.

La altas y bajas de la rapidez de corrosión en los días intermedios del tiempo de experimentación se debe a la caída y reposición de la biopelícula ya que el sistema con el cual se trabajó es dinámico (microorganismos vivos).

La relación entre la rapidez de corrosión y el logaritmo del número de bacterias/ml se representa en la figura 6.A19, en ella se observa que no hay un comportamiento general; por tal motivo presentar una ecuación matemática que relacione estos parámetros no se considera apropiado, ya que se tendrían que tomar en cuenta otras variables tales como : temperatura, pH y considerar la concentración de bacterias en la superficie del electrodo, que donde se está llevando a cabo el proceso de corrosión.

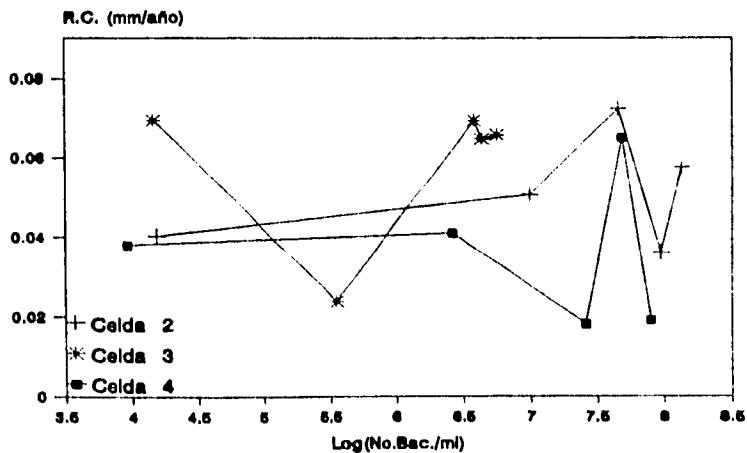


Fig. 6.A19 Rapidez de Corrosión (PT) vs. No. de Bacterias/ml.

Comparando la rapidez de corrosión que presentaron los electrodos inicio-final y periódicos se encontró que la rapidez de corrosión en los electrodos inicio-final fue mayor, debido a que los electrodos periódicos se les aplicó un barrido de potencial mayor, el cual puede provocar la muerte de las bacterias en la superficie del electrodo, causando una capa pasivante de partículas suspendidas y bacterias muertas (en el caso de las celdas con microorganismos) sobre éste. En la tabla 6.A4 se presenta el porcentaje de variación de rapidez de corrosión de los electrodos inicio-final y periódicos entre los días 0 y 36.

Prueba	Celda C1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
	% Variación de Rapidez de Corrosión			
Inicio-Fin	2.04	111.42	-31.57	56.62
Periódico	-22.02	71.84	-19.48	34.74

Donde el signo negativo indica decremento en la rapidez de corrosión.

**Tabla 6.A4.** % Variación de Rapidez de Corrosión.

## A.II.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.

### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

Al igual que en la técnica de PT, el comportamiento del potencial a circuito abierto es similar entre los electrodos a los que se les realizaron las lecturas inicio-final y periódicas (Fig. 6.A10 y Fig.6.A11 respectivamente). Los

potenciales a circuito abierto adquiridos el día cero también difieren entre sí por las mismas razones explicadas anteriormente. En las figuras mencionadas se observa que las celdas con microorganismos presentaron potenciales menos anódicos que la celda control, debido a la formación de la biopelícula. Estas gráficas son muy similares a las obtenidas con PT.

Las variaciones importantes en los potenciales a circuito abierto se registraron principalmente durante la fase exponencial de la curva de crecimiento, esto también es atribuible a la formación de pequeñas celdas de aireación.

#### **b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.**

Los datos obtenidos de los electrodos sometidos a los barridos de potencial se ajustaron aceptablemente a una línea recta, la cual pierde linealidad conforme transcurre el tiempo de experimentación, esto puede observarse en las figuras 6.A12 y 6.A13. Lo que acaba de mencionarse se puede ver más claro en la figura 6.A20, la cual muestra la variación de los coeficientes de correlación de las líneas rectas obtenidas (Apéndice 5A y 6B); en esta última gráfica se ve que las celdas con microorganismos mantienen su correlación muy cercana a uno, mientras que la celda control muestra una desviación un poco mayor, pero teniendo en cuenta que son curvas experimentales se considera que la correlación obtenida es una muy buena aproximación.

Las variaciones importantes en la rapidez de corrosión se presentan en los primeros 15 días (Fig. 6.A14). Una gráfica que representa la variación de rapidez de corrosión de los electrodos periódicos sometidos a RP se muestra en la figura

6.A21, en esta gráfica se observa que no hay un comportamiento uniforme entre las celdas.

En este caso la relación de la rapidez de corrosión y el logaritmo del número de bacterias contra el tiempo de experimentación se presenta en las figuras 6.A22, 6.A23 y 6.A24 para las celdas 2, 3 y 4 respectivamente. Para las celdas 2 y 4 se observa que la rapidez de corrosión hasta la fase estacionaria de la curva de crecimiento presenta cambios constantemente, debido a la formación de pequeñas celdas de aireación; posteriormente hay un período en donde la rapidez de corrosión presenta un decremento, debido a un efecto pasivante al recubrirse la superficie de los electrodos por la biopelícula.

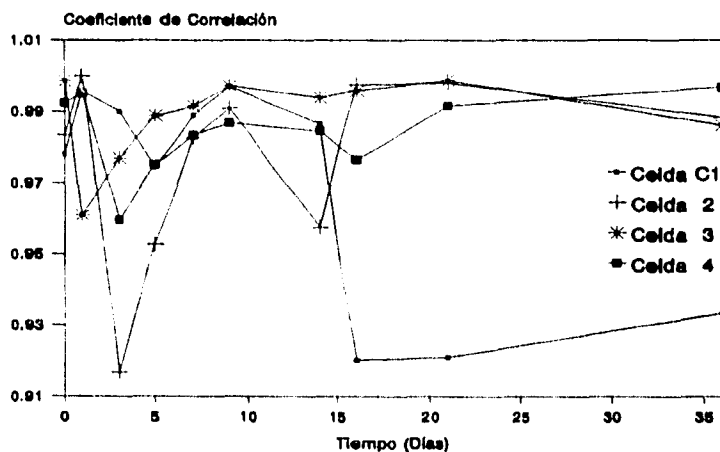


Fig. 6.A20 Variación del Coeficiente de Correlación (RP).

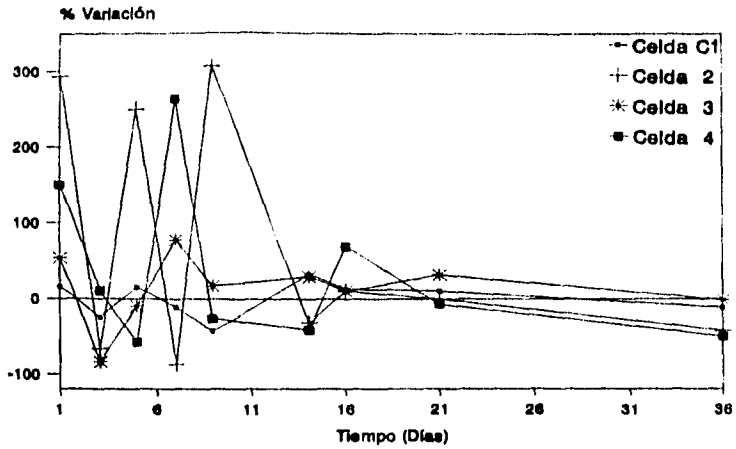


Fig. 6.A21 Variación de la Rapidez de Corrosión (RP).

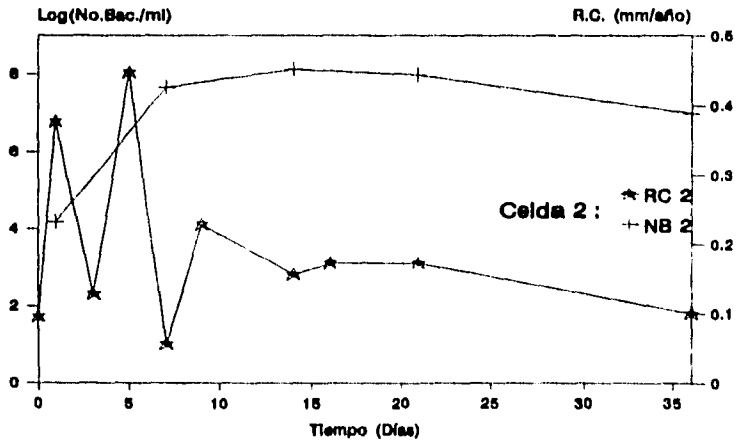


Fig. 6.A22 Curva de Crecimiento (Cuenta de Viables) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.

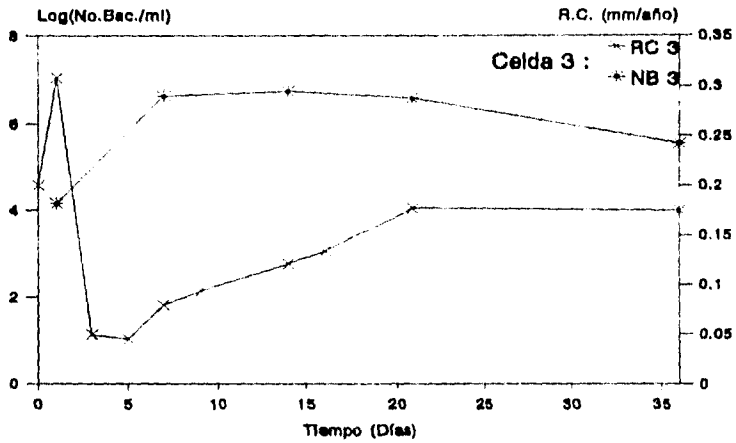


Fig. 6.A23 Curva de Crecimiento (Cuenta de Viables) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.

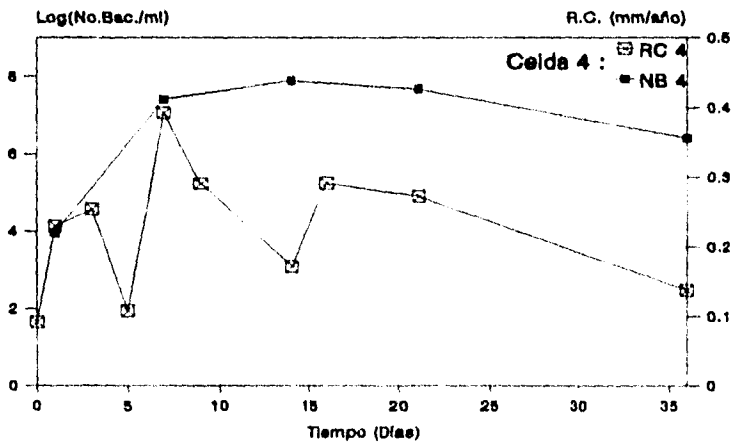


Fig. 6.A24 Curva de Crecimiento (Cuenta de Viables) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.



Para la celda 3 que es la que presenta menor número de bacterias (Fig. 6.A23) se observa que en los primeros tres días hay variaciones en la rapidez de corrosión y posteriormente hasta la fase de declinación hay un incremento paulatino, esto se atribuye a que la formación de la biopelícula pasivante es más lenta que en las celdas con un número de bacterias mayor.

La relación entre rapidez de corrosión y el logaritmo de la concentración bacteriana se representa en la figura 6.A25, al igual que para PT, en ésta se observa que no hay un comportamiento general.

Al igual que en las pruebas de PT, al comparar la rapidez de corrosión que presentaron los electrodos inicio-final y periódicos se encontró que la rapidez de corrosión en los electrodos inicio-final fue mayor.

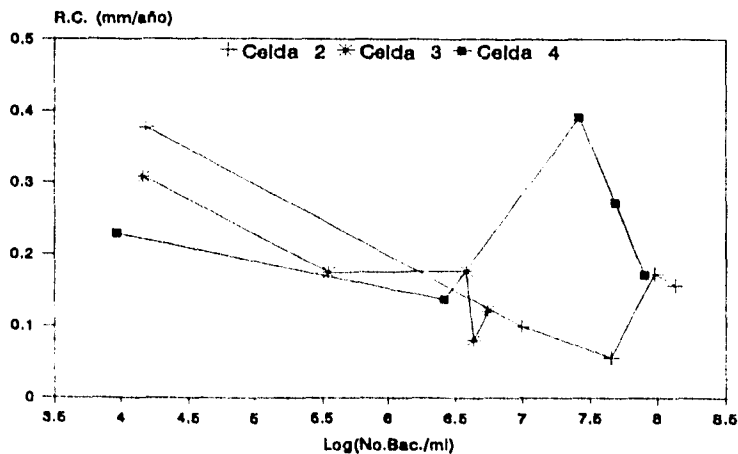


Fig. 6.A25 Rapidez de Corrosión (RP) vs. No. de Bacterias/ml.

En la tabla 6.A5 se presenta el porcentaje de variación de rapidez de corrosión de los electrodos inicio-final y periódicos entre los días 0 y 36.

Prueba	Celda C1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
	% Variación de Rapidez de Corrosión			
Inicio-Fin	73.41	3.18	9.76	90.97
Periódico	-23.91	3.71	-12.96	49.74

Donde el signo negativo indica decremento en la rapidez de corrosión.

**Tabla 6.A5** Variación de Rapidez de Corrosión.

### A.III MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

Mediante la comparación de las fotos de antes y después de la exposición de las piezas de acero A.I.S.I. 1010 se reafirma que las bacterias *Pseudomonas aeruginosa* provocan una corrosión por picadura (Foto 6.A5), mientras que el medio de cultivo causa únicamente corrosión en placas (Foto 6.A4), la cual puede facilitar el ataque microbiano del material en estudio. La corrosión en placas abarca los casos intermedios entre corrosión uniforme y corrosión localizada, el ataque se presenta como un ataque general (Ref. 16).

## 6.2 EXPERIMENTO B.

Este experimento contempla la corrosión en condiciones anaerobias del acero A.I.S.I. 1010 inducido por la bacteria *Desulfovibrio desulfuricans* en medio ATCC.

### B.1 pH Y TEMPERATURA.

Los cambios de temperatura a lo largo del experimento se pueden apreciar en la figura 6.B1. Se observa que se tuvo una temperatura promedio de 18°C, con una temperatura máxima de 21°C en el día cero y una mínima de 17°C en la etapa intermedia de la prueba. Todas las celdas muestran un comportamiento similar.

El comportamiento del pH de las celdas de corrosión respecto al tiempo se muestra en la gráfica 6.B2, en ella se aprecian tres etapas: la primera, para todas las celdas, abarca los primeros cinco días en donde se presenta un incremento del pH no rebasando un valor de 7.7. La segunda etapa se presenta a partir del día cinco y hasta el día 14 donde el incremento de pH con bacterias es brusco, por ejemplo, para la celda 2 se alcanzó un valor máximo de 9, mientras que la celda 1 (celda control) presenta un pequeño incremento en el pH, respecto a las celdas con *Desulfovibrio desulfuricans*. La tercera etapa comprende del día 14 al final de la prueba, en ella el pH de las todas las celdas se mantiene prácticamente constante.

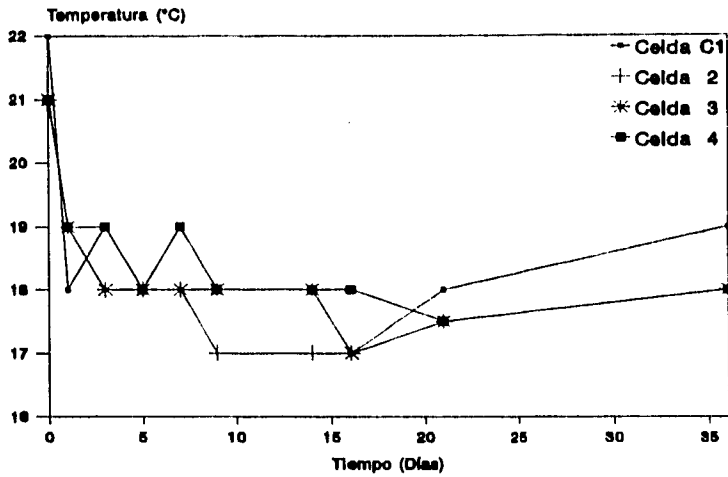


Fig. 6.B1 Temperatura de las celdas.

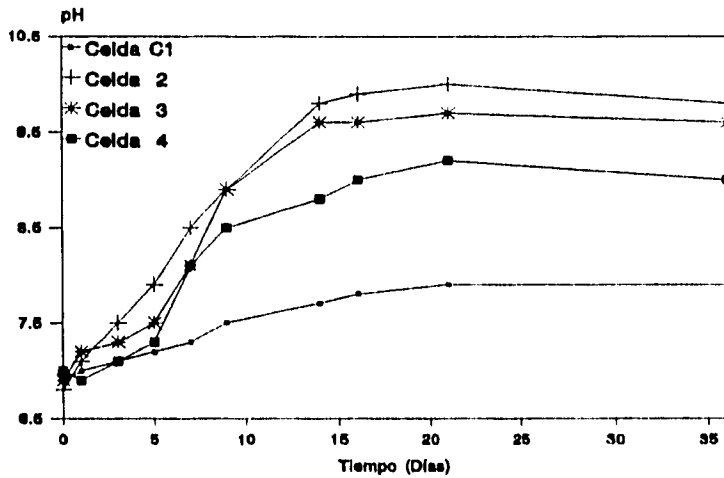


Fig. 6.B2 Variación de pH.

## B.2 PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.

### B.2.1 TINCIÓN DE GRAM.

La mezcla de bacterias sulfato reductoras sometida a esta prueba presentó homogeneidad en el teñido (rojo) de las bacterias e igualdad en su aspecto, el cual fue de pequeños vibriones -forma de coma (,)-. Por lo anterior podemos decir que se tenía un única clase de bacterias gram negativas (*Desulfovibrio desulfuricans*).

### B.2.2 CURVA DE CRECIMIENTO.

En el medio de cultivo (ATCC) usado en este experimento, el crecimiento de la mezcla de bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) se hace evidente por la presencia de un precipitado negro (FeS), característica del desarrollo de estas bacterias en medios con iones  $Fe^{2+}$  disueltos.

Confrontando la coloración de las celdas, entre sí o con la celda control, es posible hacer una apreciación cualitativa de cual de ellas es la que presenta mayor población, una comparación de la celda control con una celda con microorganismos se puede apreciar en la foto 6.B1.

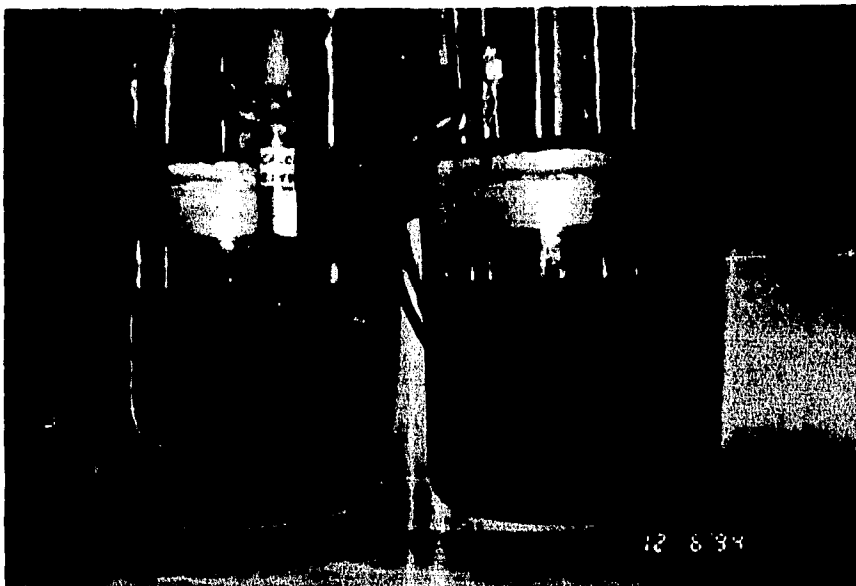


Foto 6B.1 Comparación de la celda control y una celda con *D. desulfuricans*.

a. NEFELOMETRÍA.

La curva de crecimiento obtenida mediante la técnica nefelométrica se muestra en la figura 6.B3. Cada una de las fases de la curva se describen a continuación:

La fase exponencial de la curva de crecimiento se presenta durante los primeros 15 días, siendo más evidente en las celdas 2 y 3; posteriormente se mantiene casi constante (fase

estacionaria máxima). La celda que presentó un mayor crecimiento fue la número 2, con una población de  $13 \times 10^9$  bacterias/ml y la que presentó menor crecimiento fue la celda 4 con  $6.2 \times 10^9$  bacterias/ml. Los valores de concentración bacteriana no corresponde al mostrado en la figura, debido a que en la curva de crecimiento se trazan los datos del logaritmo de la concentración bacteriana contra tiempo.

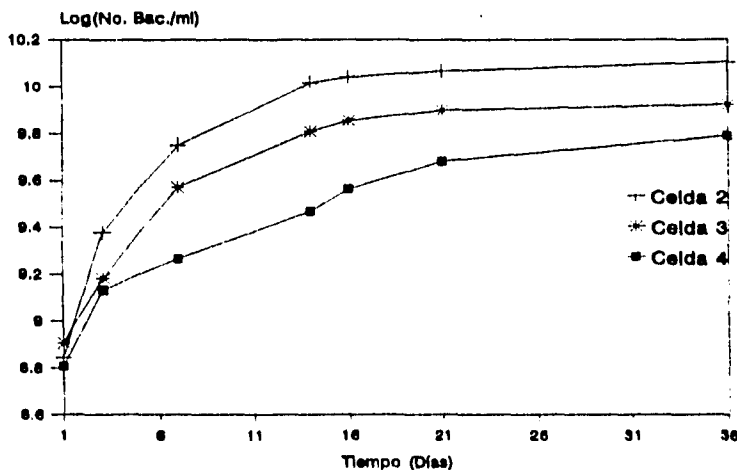


Fig. 6.B3 Curva de Crecimiento (Nefelometría).

#### b. CUENTA DE BACTERIAS VIABLES.

En la técnica para realizar la cuenta de bacterias viables resultó muy complicado obtener una mezcla homogénea del medio de cultivo y la alicuota de las bacterias, ya que esta mezcla solidifica rápidamente y dificulta el vaciado en los tubos

tan delgados que se utilizan para hacer posible la cuenta de colonias. Por lo anterior al realizar esta prueba las colonias de bacterias crecieron aglomeradamente, haciendo imposible realizar un conteo de las mismas. El aspecto físico de las colonias es de puntos negros (Foto 6B.2).

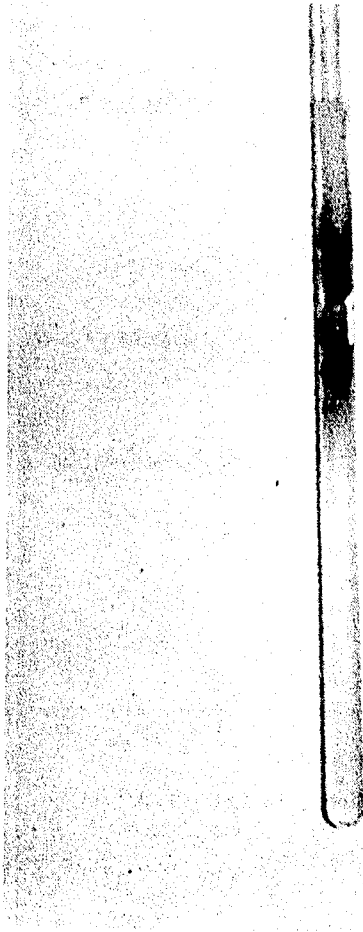


Foto 6B.2 Tubo de siembra para realizar la cuenta de bacterias viables de *D. desulfuricans*.



### B.2.4 PRUEBAS DE ACTIVIDAD QUÍMICA.

La actividad de la mezcla de bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) se representa con la desaparición del  $\text{CaSO}_4$  y la aparición de  $\text{H}_2\text{S}$ , ésta se muestra en la figura 6.B4. Se aprecia una relación casi lineal entre las concentraciones de aparición  $\text{H}_2\text{S}$  y desaparición de  $\text{CaSO}_4$  con respecto al tiempo.

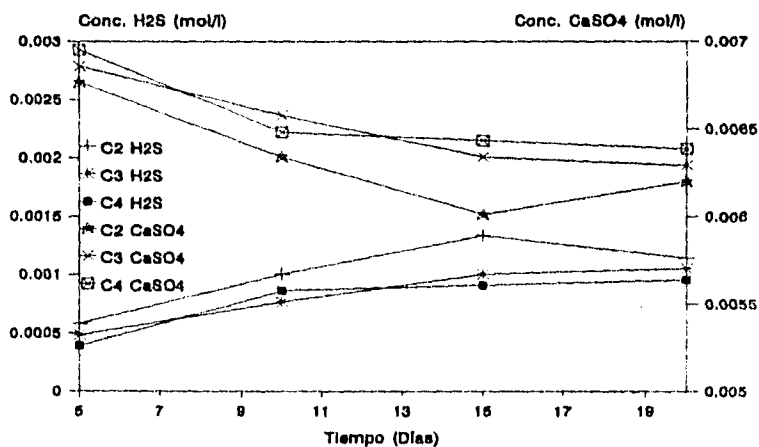


Fig. 6.B4 Curva de Actividad  
(Aparición de  $\text{H}_2\text{S}$  y Desaparición  
de  $\text{CaSO}_4$ ).

## B.3 CORRIENTE Y POTENCIAL.

Al aplicar las técnicas de pendientes de Tafel y resistencia a la polarización en este experimento se presentaron problemas de polarización por difusión, que dificultaron la obtención de los valores de corriente y potencial. Las celdas que más problemas causaron fueron las celdas con *Desulfovibrio desulfuricans* 2 y 3, mientras que la celda 1 (celda control) y la celda 4 con microorganismos únicamente presentaron problemas durante la etapa final de la prueba. La técnica que más problemas causó fue PT; debido a lo complejo que resultó obtener los resultados de este experimento, para ambas técnicas en algunos días no fue posible obtener valores de corriente y potencial.

Los resultados que se obtuvieron se presentan a continuación :

### B.3.1 PENDIENTES DE TAFEL.

#### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

El comportamiento del potencial a circuito abierto respecto al tiempo, en los electrodos que se sometieron a una polarización al inicio y otra al final y periódicamente, no es reproducible ya que el potencial a circuito abierto no se comporta de la misma forma. Los únicos electrodos que presentan un comportamiento similar en ambas pruebas (inicio-final y periódica) son los de las celdas de corrosión 2 y 3; las cuales

tienen un potencial casi constante.

El electrodo inicio-final de la celda 1 (celda control) presenta los potenciales más anódicos, respecto a los electrodos de las celdas con *Desulfovibrio desulfuricans* (Fig. 6.B5), mientras que para el electrodo periódico el potencial tiende a un comportamiento inverso respecto al electrodo inicio-final, presentando los potenciales más catódicos (Fig. 6.B6).

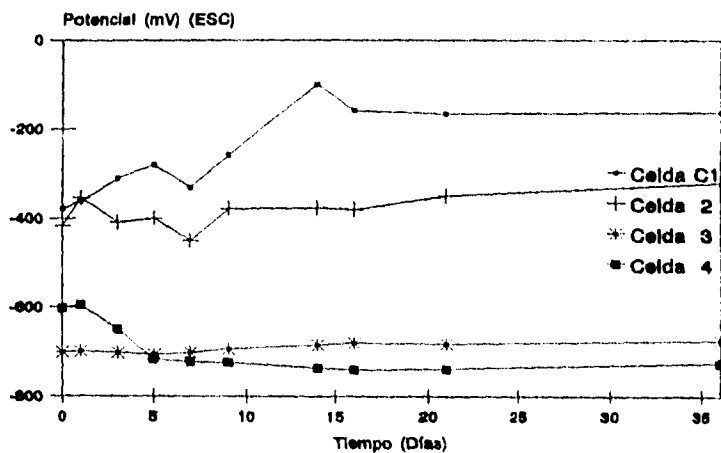


Fig. 6.B5 Potencial a circuito abierto (PT)  
(Inicio-final).

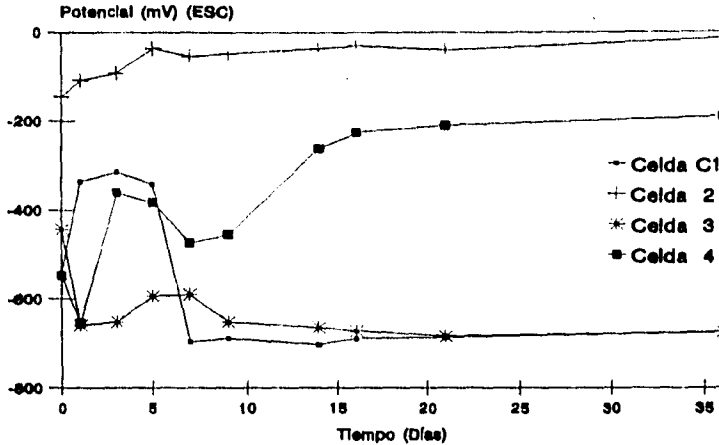


Fig. 6.B6 Potencial a circuito abierto (PT)  
(Periódico)

#### b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.

El procedimiento para obtener las pendientes de Tafel es idéntico al descrito en el experimento A. En este experimento se obtuvieron 48 gráficas en total (contando electrodos de inicio-final y periódicos de cada celda). Por las razones expuestas en el experimento anterior únicamente se muestran las gráficas de los barridos de los electrodos periódicos de los días 0 y 21 de la prueba de las celdas 1 (control) y 4 (con *Desulfovibrio desulfuricans*), figuras 6.B7 y 6.B8 respectivamente.

El procedimiento para obtener los datos de rapidez ya se describió anteriormente. No fue posible obtener todos los datos de rapidez de corrosión ya que al realizar el barrido se presentaron problemas de polarización por difusión, un ejemplo

de esta desviación al comportamiento de Tafel se presenta en la figura 6.B9. Los electrodos que presentaron este comportamiento en los primeros días fueron el 2 y el 3; al final de la prueba las cuatro celdas presentaron este problema.

La tabla 6.B1 presenta los valores obtenidos de rapidez de corrosión de los electrodos sometidos a esta técnica.

Tiempo Días	Celda 1		Celda 2		Celda 3		Celda 4	
	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per
0	0.007	0.008	0.006	0.058	0.011	0.056	0.006	0.007
1		0.019		0.057		0.056		0.021
3		0.021		0.056		0.047		0.014
5		0.014		----		0.027		0.011
7		0.029		----		0.030		0.013
9		0.025		----		----		0.009
14		0.014		----		----		0.015
16		0.006		----		----		0.017
21		0.011		----		----		0.018
36	----	----	----	----	----	----	----	----

Tabla 6.B1 Rapidez de Corrosión (mm/año).

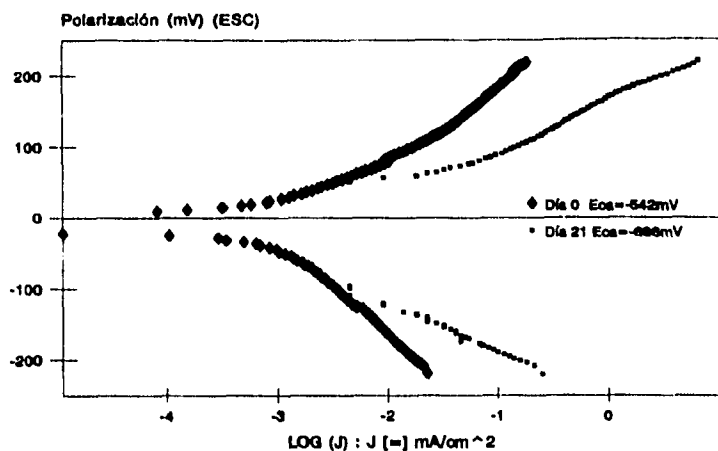


Fig. 6.B7 Pendientes de Tafel (Celda C1).

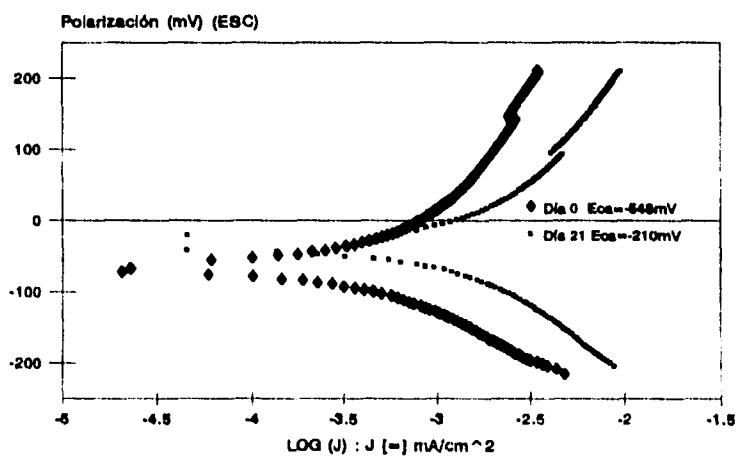
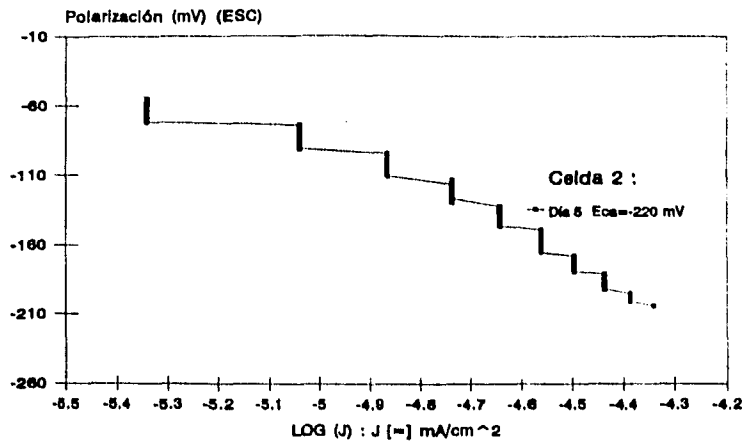


Fig. 6.B8 Pendientes de Tafel (Celda 4).



**Fig. 6.B9 Pendientes de Tafel  
Desviación del comportamiento típico  
por efecto de una polarización por difusión.**

La rapidez de corrosión se encuentra representada en la figura 6.B10. En ella se puede ver que los electrodos de las celdas con *Desulfovibrio desulfuricans* 2 y 3 fueron los electrodos que más problemas presentaron y los únicos datos obtenidos fueron para los primeros días, por tal motivo no se puede describir ningún comportamiento.

El electrodo periódico de la celda de corrosión 1 (celda control) al inicio de la prueba presentó una rapidez de corrosión mayor que el electrodo de la celda 4 (celda con microorganismos), a partir del día siete la rapidez de corrosión empieza a disminuir hasta que al final de la prueba alcanza una rapidez de corrosión menor a la del electrodo de la celda 4.

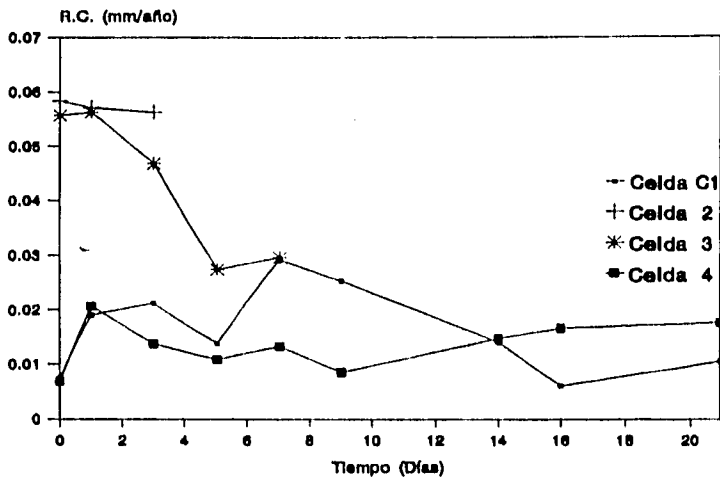


Fig. 6.B10 Rapidez de Corrosión (PT).

### B.3.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.

#### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

En las figuras 6.B11 y 6.B12, se puede ver que las variaciones del potencial a circuito abierto para los electrodos sometidos a mediciones de potencial al inicio y al final y periódicamente mediante esta técnica son muy similares a las obtenidas con los electrodos de las pruebas de Tafel.

El comportamiento del potencial a circuito abierto respecto al tiempo en tales electrodos no es reproducible, ya que el potencial a circuito abierto para las celdas de



corrosión con *Desulfovibrio desulfuricans* no evoluciona de la misma forma. Los electrodos que presentan un comportamiento similar en ambas pruebas (inicio-final y periódico) son los de las celdas de corrosión con microorganismo 2 y 3, los cuales manifiestan pocas variaciones en la evolución del potencial; el electrodo periódico de la celda 2 fue el que manifestó los potenciales más anódicos manteniéndose alrededor de  $-250\text{mV}$ , mientras que el electrodo de la celda 3 exhibió potenciales más catódicos manteniéndose alrededor de  $-700\text{mV}$ .

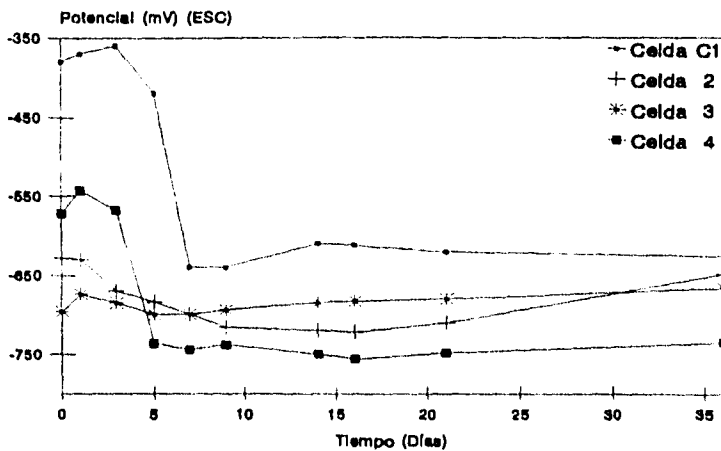


Fig. 6.B11 Potencial a circuito abierto (RP)  
(Inicio-final).

El electrodo inicio-final de la celda 1 (celda control) mostró los potenciales más anódicos, respecto a los electrodos de las celdas con microorganismos (Fig. 6.B9), mientras que para el electrodo periódico el potencial se inclina a un comportamiento inverso respecto al electrodo inicio-final,

presentando los potenciales más catódicos (Fig. 6.B10).

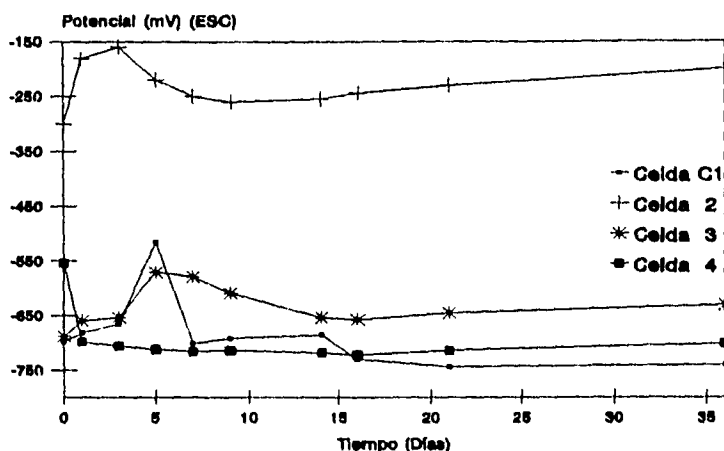


Fig. 6.B12 Potencial a circuito abierto (RP) (Periódico).

#### b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.

Los datos de resistencia a la polarización se calcularon de forma análoga al experimento A. De esta prueba se obtuvieron 48 gráficas en total (contando electrodos de inicio-final y periódicos de cada celda). Por las razones expuestas en el experimento A únicamente se muestran las gráficas de los barridos de los electrodos periódicos de los días 0 y 36 de la prueba de las celdas 1 (control) y 4 (con microorganismo), figuras 6.B13 y 6.B14 respectivamente. En este caso, se puede ver claramente que al día 36 se presentó el problema de polarización por difusión por la descomposición del medio (aparición de precipitados), tanto en la celda 1 (control) como

en las celdas con microorganismos.

El método para obtener los valores de rapidez de corrosión ya fue descrito (Apéndice 6B). Mediante esta técnica si fue posible obtener todos los datos de rapidez de corrosión. La tabla 6.B2 presenta los valores obtenidos de rapidez de corrosión de los electrodos sometidos a esta técnica.

Tiempo Días	Celda 1		Celda 2		Celda 3		Celda 4	
	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per
0	0.185	0.147	0.246	0.253	0.289	0.298	0.191	0.289
1		0.110		0.371		0.364		0.356
3		0.512		0.463		0.153		0.264
5		0.055		0.389		0.107		0.227
7		0.227		0.417		0.271		0.245
9		0.193		0.478		0.170		0.410
14		0.047		0.464		0.394		0.258
16		0.080		0.347		0.312		0.345
21		0.078		0.363		0.200		0.355
36	0.128	0.100	0.362	0.362	0.346	0.293	0.286	0.359

**Tabla 6.B2** Rapidez de Corrosión (mm/año).

El comportamiento de la rapidez de corrosión a lo largo de la prueba fue aleatorio, éste puede verse en la figura 6.B15. Es importante hacer hincapié, que la rapidez de corrosión de la celda control fue menor que la obtenida para las celdas con bacterias.

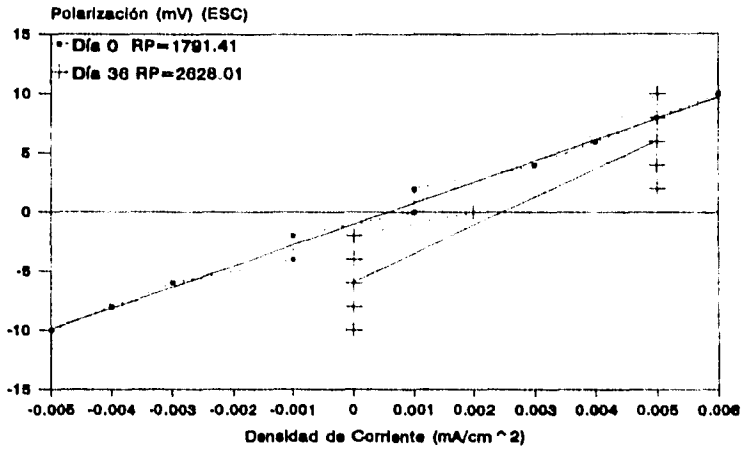


Fig. 6.B13 Resistencia a la Polarización (Celda C1).

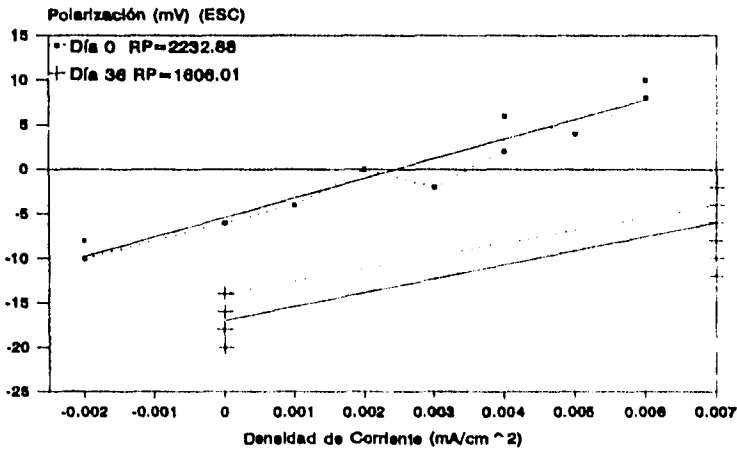


Fig. 6.B14 Resistencia a la Polarización (Celda 4).

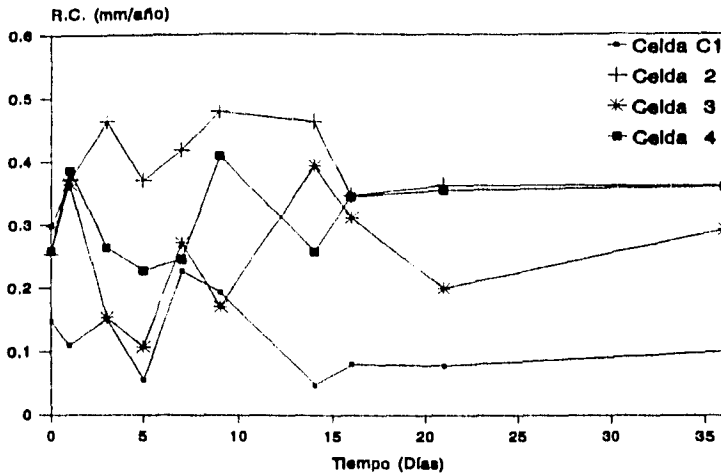


Fig. 6.B15 Rapidez de Corrosión (RP).

## B.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

En la Foto 6.A3 se presentó la superficie pulida a espejo de una de las muestras de acero A.I.S.I. 1010 antes de la exposición al medio corrosivo, ésta nos muestra una superficie casi uniforme, a excepción de algunas cavidades inherentes a la fabricación del acero.

En la Foto 6.B3 se observa el efecto del medio de cultivo en la pieza de acero, en ella se ve una ligera corrosión en placas (Ref. 6) en la superficie de la pieza de acero.

El efecto de las bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) sobre la pieza de acero se presenta en la Foto 6.B4, en esta fotografía se muestra el efecto del ataque de las bacterias el cual se ve que es en forma de orificios o picaduras, se pueden distinguir cavidades de diferente magnitud y aspecto.

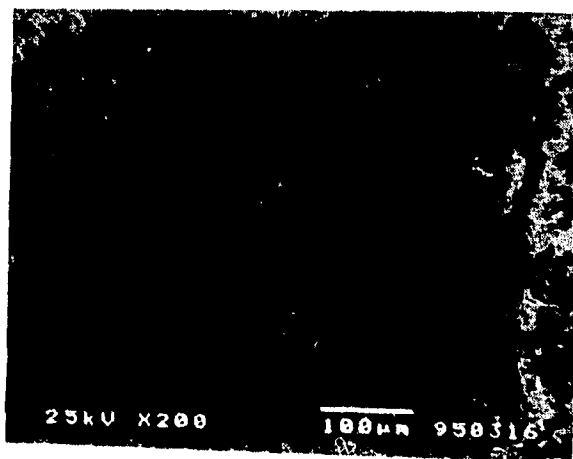
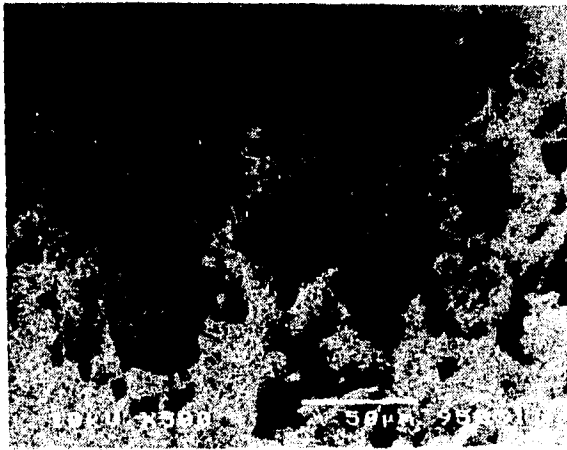


Foto 6.B3 Efecto del medio de cultivo ATTC sobre la pieza de acero.



**Foto 6.B4** Efecto del *Desulfovibrio desulfuricans* en medio ATCC sobre la pieza de acero.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO B.

### B.I ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS.

Como ya se mencionó en el capítulo de microbiología la temperatura es un factor muy importante en el crecimiento de las bacterias y aunque la mezcla de bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) no se mantuvo en la temperatura óptima de crecimiento no fue un factor decisivo en el crecimiento de los microorganismos, ya que a pesar de mantenerse a 18°C, en promedio, el crecimiento sí se dio (Fig. 6.B3), tal crecimiento fue posible identificarlo por medio de la aparición de la coloración negra del medio de cultivo (Foto 6B.1). La curva de crecimiento obtenida mediante nefelometría proporciona concentraciones bacterianas muy superiores a las que se obtendrían por la cuenta de bacterias viables, ya que participan todas las partículas presentes en el medio.

Los resultados no son confiables debido a que se presentó una formación de sulfuro de hierro (FeS) y la turbiedad del medio fue excesiva ya que hubo cambios químicos que no fueron por la actividad microbiana lo que ocasionó una interferencia con la determinación nefelométrica.

El medio ATCC específico para *Desulfovibrio desulfuricans* se modificó con un par conjugado ácido/base ( $KH_2PO_4/K_2HPO_4$ ) para darle un efecto buffer, buscando amortiguar los cambios de pH y evitar una descomposición rápida del medio por efecto del mismo, ya que durante la fase preliminar de la prueba se



observó que este medio era muy sensible a valores de pH menores a 6 y mayores a 8.5. El efecto del buffer se manifiesta únicamente durante los primeros días de experimentación, ya que a pesar de que el producto principal del metabolismo de las bacterias sulfato reductoras es ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) no hay un decremento significativo en el pH (Fig. 6B2). El aumento del pH en los días posteriores se debe a la producción de iones hidroxilo ( $OH^-$ ) como resultado de la despolarización causada por la misma bacteria y como consecuencia de este incremento se presentó la descomposición progresiva del medio.

La actividad de las bacterias en estudio se mostró en la figura 6.B4, en esta gráfica se manifiesta la reducción del sulfato de calcio debida a la acción bacteriana; el desarrollo de  $H_2S$  confirma que es la bacteria la que promueve la corrosión del acero en estudio.

## **B.II ASPECTOS ELECTROQUÍMICOS.**

### **B.II.1. PENDIENTES DE TAFEL.**

#### **a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.**

El comportamiento del potencial a circuito abierto de los electrodos sometidos a un barrido inicio-final o a barridos periódicos no presentaron comportamientos similares, esto es particularmente cierto si la comparación que se hace es entre los electrodos sometidos a un barrido diferente (inicio-final o periódico) con una misma técnica (PT o RP), para este caso el comportamiento tiende a ser inverso entre los electrodos comparados (Figuras 6.B5 y 6.B6 ó 6.B11 y 6.B12); en cambio si

se realiza una comparación de los electrodos sometidos a un mismo barrido pero con técnica diferente el comportamiento es similar entre ellos (Figuras 6.B5 y 6.B11 ó 6.B6 y 6.B12).

Al igual que en el experimento anterior, los potenciales a circuito abierto adquiridos el día cero difieren entre sí, debido a que las superficies de los electrodos no son idénticas, las diferencias son atribuidas al pulido y a los defectos de fabricación del acero (Foto 6.A3).

#### **b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.**

La forma de la curvas para obtener las pendientes de Tafel, pueden observarse en las figuras 6.B7 y 6.B8; estas figuras son de los electrodos de las celdas 1 (control) y 4 (con microorganismos) que fueron los que dieron respuesta casi hasta el final de la prueba. Debido a problemas de difusión que presentó el medio de cultivo, en algunos días no se obtuvo respuesta en los electrodos.

Se observa que al inicio de la prueba las curvas que se obtienen son de la forma típica de las pendientes de Tafel, los barridos anódico y catódico son prácticamente líneas rectas (control mixto). El último día que los electrodos de las celdas 1 (control) y 4 (con microorganismos) dieron respuesta fue el día 21.

Se aprecia que la celda 1 (control), al inicio de la prueba, mostró un control mixto; mientras que en los últimos días, al presentarse la descomposición del medio (presencia de precipitados) disminuye su conductividad eléctrica, por lo que comienza a presentarse un control por resistencia (Fig. 6.B7).

se realiza una comparación de los electrodos sometidos a un mismo barrido pero con técnica diferente el comportamiento es similar entre ellos (Figuras 6.B5 y 6.B11 ó 6.B6 y 6.B12).

Al igual que en el experimento anterior, los potenciales a circuito abierto adquiridos el día cero difieren entre sí, debido a que las superficies de los electrodos no son idénticas, las diferencias son atribuidas al pulido y a los defectos de fabricación del acero (Foto 6.A3).

#### **b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.**

La forma de la curvas para obtener las pendientes de Tafel, pueden observarse en las figuras 6.B7 y 6.B8; estas figuras son de los electrodos de las celdas 1 (control) y 4 (con microorganismos) que fueron los que dieron respuesta casi hasta el final de la prueba. Debido a problemas de difusión que presentó el medio de cultivo, en algunos días no se obtuvo respuesta en los electrodos.

Se observa que al inicio de la prueba las curvas que se obtienen son de la forma típica de las pendientes de Tafel, los barridos anódico y catódico son prácticamente líneas rectas (control mixto). El último día que los electrodos de las celdas 1 (control) y 4 (con microorganismos) dieron respuesta fue el día 21.

Se aprecia que la celda 1 (control), al inicio de la prueba, mostró un control mixto; mientras que en los últimos días, al presentarse la descomposición del medio (presencia de precipitados) disminuye su conductividad eléctrica, por lo que comienza a presentarse un control por resistencia (Fig. 6.B7).

En presencia de microorganismos, al día 21 se obtiene una gráfica muy semejante a la del inicio, en cuanto a la forma, pero presentando un desplazamiento hacia valores mayores en el logaritmo de la densidad de corriente (Fig.6.B8). Esto da pie a pensar que el control en la superficie del electrodo se mantiene en un control mixto a lo largo de la prueba.

Una representación gráfica de la variación de rapidez de corrosión se muestra en la figura 6.B16, en ella se puede ver que esta variación es de tipo aleatorio.

En este caso sólo se pudo relacionar la rapidez de corrosión y el número de bacterias contra el tiempo de experimentación para la celda 4 (con microorganismo). En esta ocasión se encontró que el incremento más importante en la rapidez de corrosión se da en la fase exponencial de la curva de crecimiento, posteriormente se presenta un decremento en la rapidez. A partir de ese decremento de rapidez, ésta última crece paulatinamente debido al aumento en la concentración bacteriana, esto se puede ver en la figura 6.B17.

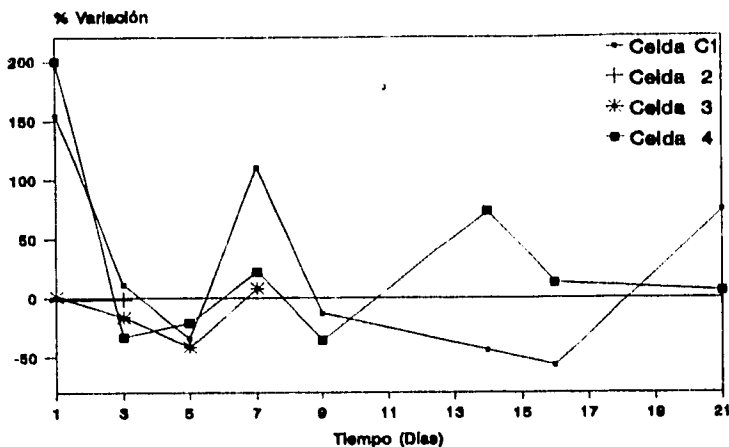


Fig. 6.B16 Variación de la Rapidez de Corrosión (PT).

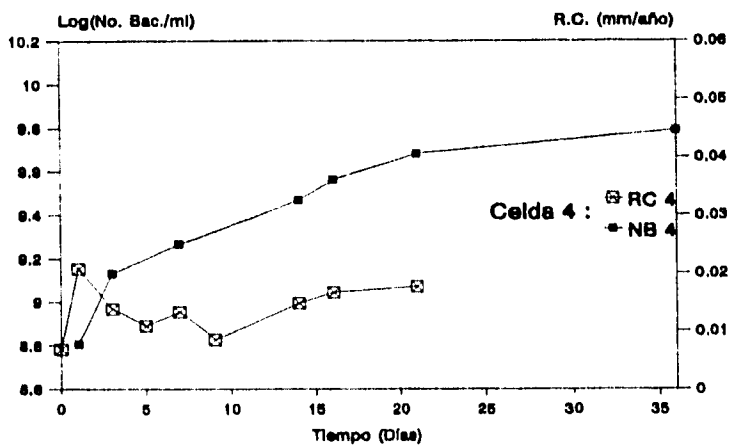


Fig. 6.B17 Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (PT) vs. Tiempo.

## **B.II.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.**

### **a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.**

Los potenciales a circuito abierto presentan un comportamiento semejante al descrito para la técnica de PT. Las variaciones importantes en los potenciales a circuito abierto se registran principalmente durante la fase exponencial de la curva de crecimiento (Figuras 6B.11, 6B.12)

### **b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.**

El ajuste de los datos obtenidos de los barridos de potencial, mediante esta técnica, dio una buena aproximación a una línea recta, la cual pierde linealidad conforme transcurre el tiempo de experimentación, siendo más pronunciada la desviación para las celdas con microorganismos (Figuras 6.B13 y 6.B14).

Lo anterior se analiza con mayor claridad en la figura 6.B18, donde se ve que las todas las celdas durante los primeros 21 días muestran los coeficientes de correlación aceptables, guardando una correlación alrededor de 0.97; al final del experimento se manifiestan los coeficientes de correlación mucho menores (0.80); pero aún aceptables, teniendo en cuenta que se presentó el problema de polarización por difusión.

La rapidez de corrosión de los electrodos periódicos sometidos a RP, presentó variaciones durante la experimentación; las cuales fueron disminuyendo conforme transcurrió el tiempo (Fig. 6.B19).

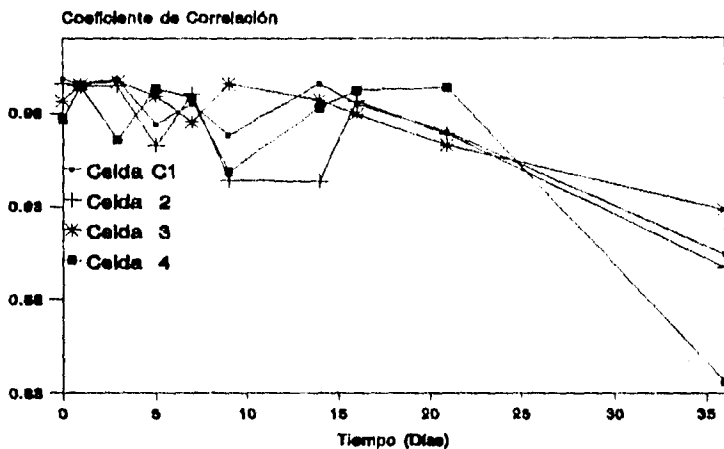


Fig. 6.B18 Variación del Coeficiente de Correlación (RP).

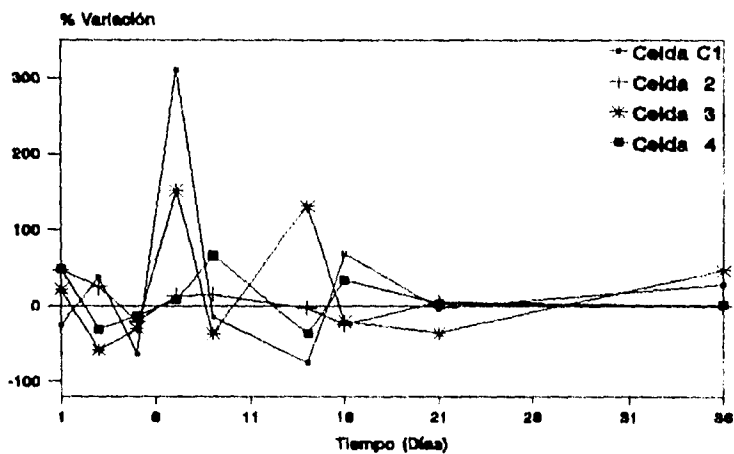


Fig. 6.B19 Variación de la Rapidez de Corrosión (RP).

La relación de la rapidez de corrosión y número de bacterias contra el tiempo de experimentación se exhibe en las figuras 6.B20, 6.B21 y 6.B22 para las celdas con microorganismos 2, 3 y 4 respectivamente. En las tres celdas la rapidez de corrosión presenta mayores variaciones durante la fase exponencial de la curva de crecimiento, mientras que en la fase estacionaria la rapidez casi permanece constante, esto puede atribuirse a que en la superficie de los electrodos se presente un efecto pasivante ocasionado por la presencia de productos de corrosión, bacterias muertas, partículas presentes en el seno del medio y caída óhmica.

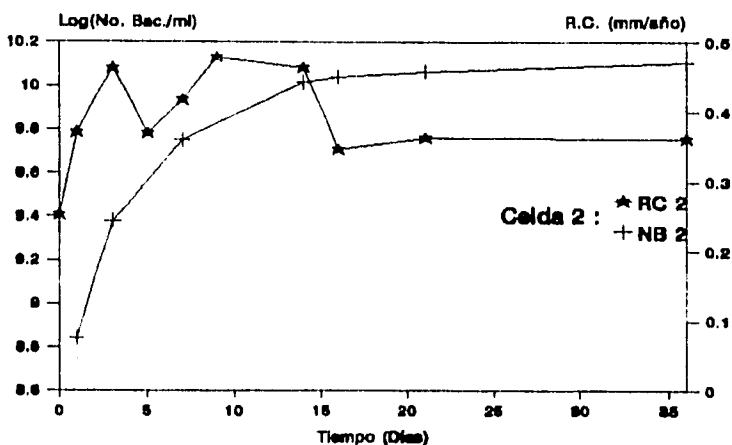


Fig. 6.B20 Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.



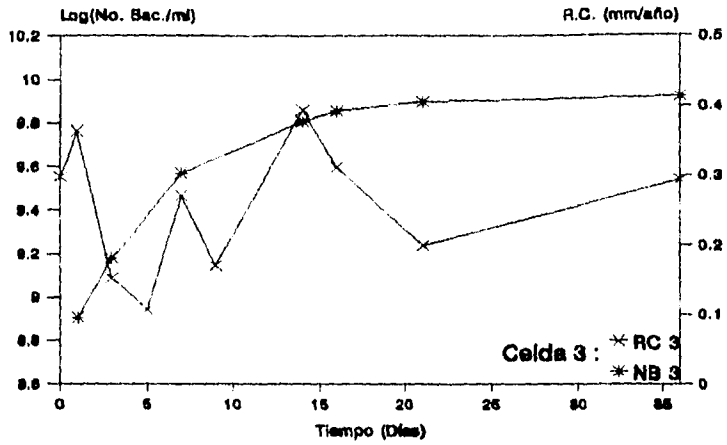


Fig. 6.B21 Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.

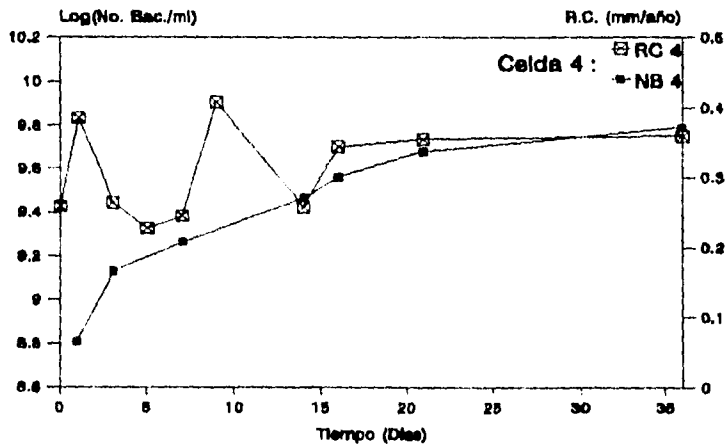
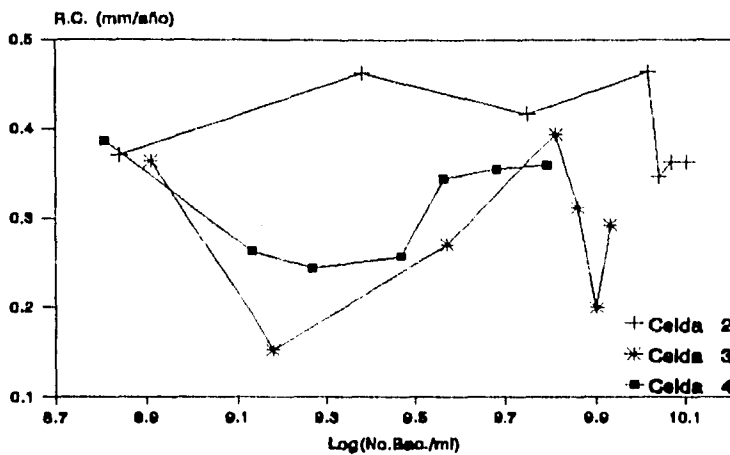


Fig. 6.B22 Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.

Al representar gráficamente la rapidez de corrosión contra el logaritmo del número de bacterias por mililitro, figura 6.B23, no se encontró un comportamiento que describa cuantitativamente la relación entre los parámetros mencionados.



**Fig. 6.B23 Rapidez de Corrosión (RP) vs. No. de Bacterias/ml.**

Al comparar la rapidez de corrosión que presentaron los electrodos inicio-final y periódicos se encontró que la rapidez de corrosión en los electrodos inicio-final fue mayor. En la tabla 6.B3 se presenta el porcentaje de variación de rapidez de corrosión de los electrodos inicio-final y periódicos entre los días 0 y 36.

Prueba	Celda C1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
	% Variación de Rapidez de Corrosión			
Inicio-Fin	-30.74	47.09	19.30	49.35
Periódico	-31.83	43.35	-1.71	39.03

Donde el signo negativo indica decremento en la rapidez de corrosión.

**Tabla 6.B3** % Variación de Rapidez de Corrosión.

## B.III MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

Haciendo la comparación de las fotos de antes y después de la exposición de las piezas de acero A.I.S.I. 1010 al medio corrosivo se confirma que las bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) inducen una corrosión por picadura (Foto 6.B4), mientras que el medio de cultivo causa únicamente corrosión en placa en la superficie del material (Foto 6.B3).

Esta comparación nos ratifica que efectivamente la corrosión que presentaron las muestras en estudio es debido en gran parte a la acción de las bacterias y no por efecto del medio de cultivo.

**NOTA:** El análisis de los resultados obtenidos mediante la técnica de pendientes de Tafel de este experimento reveló que éstos no eran muy confiables, por tal motivo se decidió diseñar un experimento (Experimento C) donde el medio de cultivo no fuera tan complejo y que fuera un medio donde comúnmente se encontrara a la bacteria en estudio (*D. desulfuricans*).

## 6.3 EXPERIMENTO C.

Este experimento contempla la corrosión en condiciones anaerobias del acero A.I.S.I. 1010 inducido por la bacteria *Desulfovibrio desulfuricans* en agua de mar sintética.

### C.1 pH Y TEMPERATURA.

En la figura 6.C1 pueden apreciarse los cambios de temperatura a lo largo del experimento. Se observa que se tuvo una temperatura promedio de 18°C, con una temperatura máxima de 21°C en el día cero y una mínima de 16°C en el día 17. Todas las celdas muestran un comportamiento similar.

En la figura 6.C2 se muestra la variación del pH de las celdas con respecto al tiempo. En esta gráfica se aprecian tres zonas: la primera abarca los primeros cinco días, aquí hay un decremento de pH hasta un mínimo de 5.8 en las celdas con *Desulfovibrio desulfuricans*, mientras que para la celda control el pH se incrementó hasta 6.9; la segunda zona, a partir del día cinco y hasta el día 12, presenta un comportamiento de pH en las celdas con bacterias en forma de campana, alcanzando un valor máximo de 8.3; la tercera zona comprende del día 12 al final de la prueba, en ésta el pH de todas las celdas se mantiene prácticamente constante.

## 6.3 EXPERIMENTO C.

Este experimento contempla la corrosión en condiciones anaerobias del acero A.I.S.I. 1010 inducido por la bacteria *Desulfovibrio desulfuricans* en agua de mar sintética.

### C.1 pH Y TEMPERATURA.

En la figura 6.C1 pueden apreciarse los cambios de temperatura a lo largo del experimento. Se observa que se tuvo una temperatura promedio de 18°C, con una temperatura máxima de 21°C en el día cero y una mínima de 16°C en el día 17. Todas las celdas muestran un comportamiento similar.

En la figura 6.C2 se muestra la variación del pH de las celdas con respecto al tiempo. En esta gráfica se aprecian tres zonas: la primera abarca los primeros cinco días, aquí hay un decremento de pH hasta un mínimo de 5.8 en las celdas con *Desulfovibrio desulfuricans*, mientras que para la celda control el pH se incrementó hasta 6.9; la segunda zona, a partir del día cinco y hasta el día 12, presenta un comportamiento de pH en las celdas con bacterias en forma de campana, alcanzando un valor máximo de 8.3; la tercera zona comprende del día 12 al final de la prueba, en ésta el pH de todas las celdas se mantiene prácticamente constante.

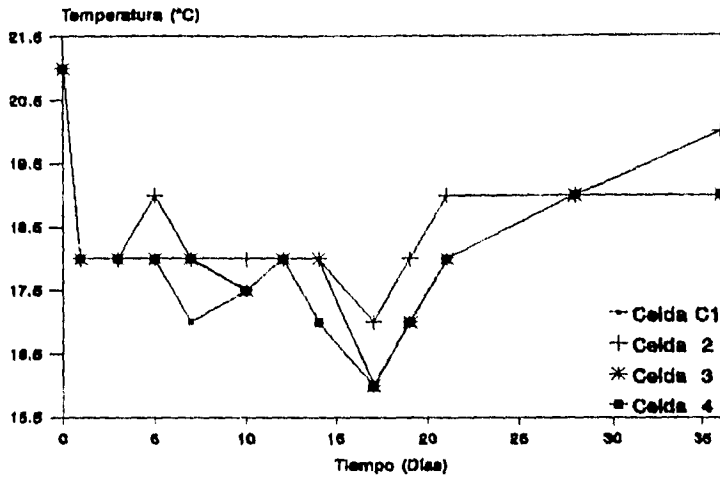


Fig. 6.C1 Temperatura de las celdas.

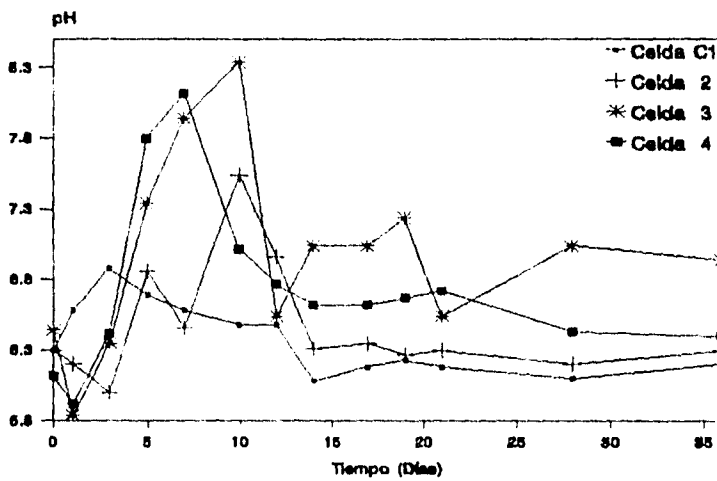


Fig. 6.C2 Variación de pH.

## C.2 PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.

### C.2.1 TINCIÓN DE GRAM.

La mezcla de bacterias sulfato reductoras sometida a esta prueba presentó uniformidad en el teñido (rojo) de las bacterias y similitud en su aspecto, el cual fue de pequeños vibriones -forma de coma (,)-. Por lo anterior podemos decir que se tenía un único tipo de bacterias gram negativas (*Desulfovibrio desulfuricans*).

### C.2.2 CURVA DE CRECIMIENTO.

El crecimiento de la mezcla de bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) se hace evidente por la tonalidad opalescente, característica del desarrollo de estas bacterias en agua de mar. Cabe mencionar que no se desarrolló una coloración negra en el seno del medio de cultivo porque en éste no se incluyeron sales ferrosas en exceso.

Comparando la coloración de las celdas, no es posible hacer una apreciación de cual de ellas es la que presenta mayor población.

#### a. NEFELOMETRÍA.

La curva de crecimiento obtenida mediante la técnica nefelométrica se muestra en la figura 6.C3, en ella podemos

observar que el comportamiento de las tres celdas con *Desulfovibrio desulfuricans* es en forma exponencial; durante los primeros 15 días se observa la fase exponencial de la curva de crecimiento, siendo más evidente en las celdas 3 y 4; posteriormente se mantiene casi constante (fase estacionaria máxima). La celda que presentó un mayor crecimiento fue la número 3, con una población de  $2.7 \times 10^9$  bacterias/ml y la que presentó menor crecimiento fue la celda 2 con  $1.2 \times 10^9$  bacterias/ml. Estos valores no son los que se aprecian en la curva de crecimiento, debido a que en ésta se trazan los valores del logaritmo de la concentración bacteriana.

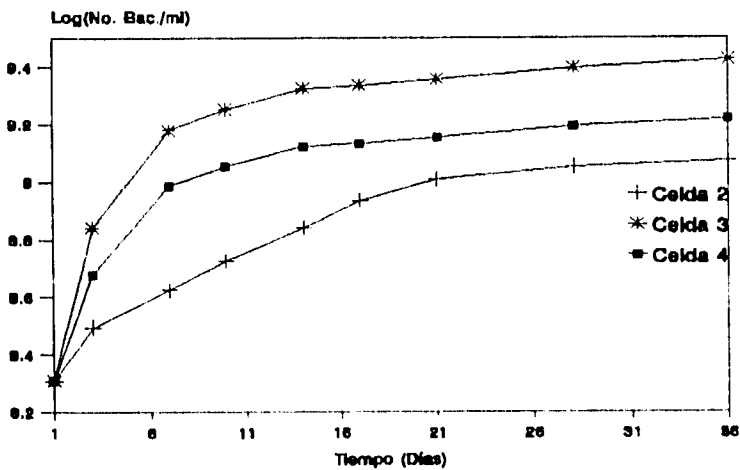


Fig. 6.C3 Curva de Crecimiento (Nefelometría).



#### b. CUENTA DE BACTERIAS VIABLES.

Por las razones expuestas en el experimento anterior, no fue posible obtener datos de la cuenta de bacterias viables. Por tal motivo únicamente se presenta la curva de crecimiento obtenida mediante la técnica nefelométrica.

### C.2.4 PRUEBAS DE ACTIVIDAD QUÍMICA.

La actividad de la mezcla de bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) se representa con la desaparición del  $\text{CaSO}_4$  y la aparición de  $\text{H}_2\text{S}$ , ésta se muestra en la figura 6.C4. Se aprecia una relación lineal entre las concentraciones de aparición  $\text{H}_2\text{S}$  y desaparición de  $\text{CaSO}_4$ , con respecto al tiempo.

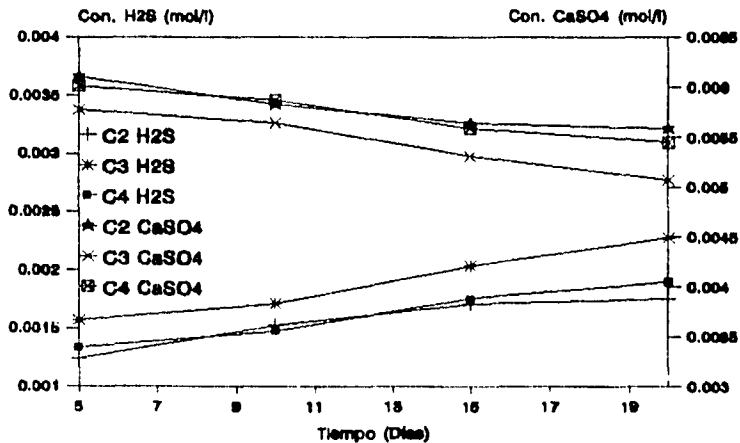


Fig. 6.C4 Curva de Actividad (Aparición de  $\text{H}_2\text{S}$  y Desaparición de  $\text{CaSO}_4$ ).

## C.3 CORRIENTE Y POTENCIAL.

### C.3.1 PENDIENTES DE TAFEL.

#### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

Los electrodos que se sometieron a una polarización al inicio y otra al final, muestran un potencial a circuito abierto (Fig. 6.C5) respecto al tiempo como se describe a continuación: los electrodos de las celdas con *Desulfovibrio desulfuricans* 2, 3 y 4 describen un comportamiento muy parecido entre sí, en los primeros cinco días crecen paulatinamente; a partir del día siete, las celdas 3 y 4 alcanzan un valor constante de -552 mV y -480 mV respectivamente, mientras que en la celda 2 el potencial sigue creciendo hasta llegar a un valor de -546 mV; la celda 1 (celda control), a partir del primer día mantiene un valor casi constante de -670mV aproximadamente. En este caso todas las celdas con microorganismos presentaron potenciales más anódicos que la celda control.

La figura 6.C6 muestra la variación del potencial a circuito abierto de los electrodos, que se sometieron a una polarización periódica. El comportamiento que se observa en este caso es prácticamente el mismo al descrito anteriormente. Los potenciales son ligeramente más catódicos para las celdas 1 y 2 que los potenciales de los electrodos sometidos a mediciones de inicio-final.

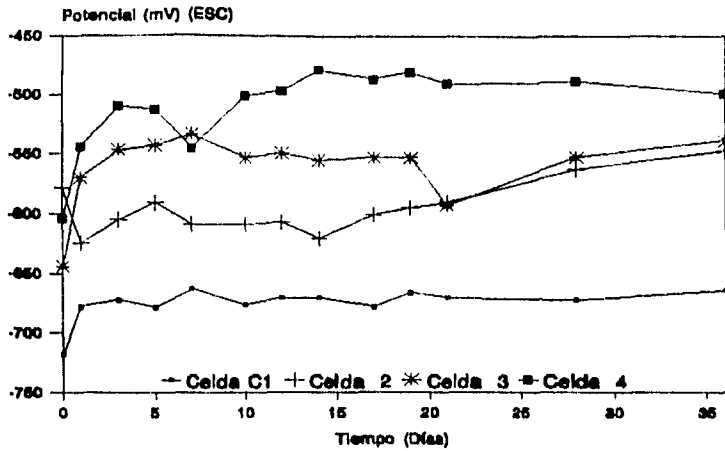


Fig. 6.C5 Potencial a circuito abierto (PT)  
(Inicio-final).

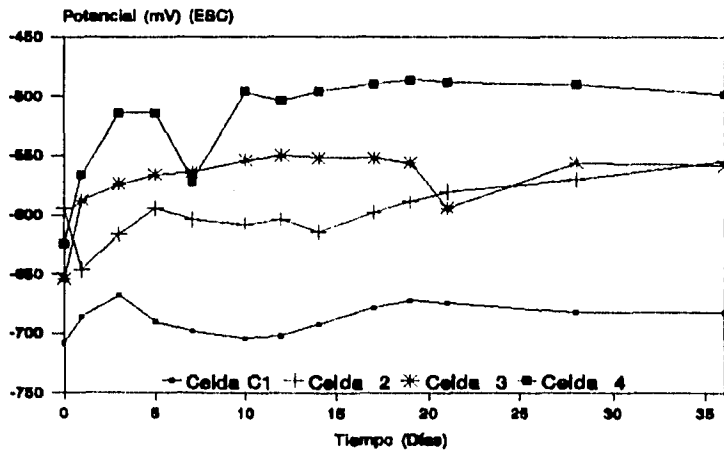


Fig. 6.C6 Potencial a circuito abierto (PT)  
(Periódico).

**b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.**

En la técnica de Pendientes de Tafel, los cálculos para obtener la rapidez de corrosión se realizan de la misma manera que para los experimentos anteriores. En este experimento se obtuvieron 60 gráficas en total (contando electrodos de inicio-final y periódicos de cada celda). Por las razones expuestas en el experimento A únicamente se muestran las gráficas de los barridos de los electrodos periódicos de día 0 y 36 de la prueba de las celdas 1 (control) y 3 (con microorganismo), figuras 6.C7 y 6.C8 respectivamente. La tabla 6.C1 presenta los valores de rapidez de corrosión de los electrodos sometidos a esta técnica. Una representación gráfica de la rapidez de corrosión, se encuentra en la figura 6.C9.

Tiempo	Celda 1		Celda 2		Celda 3		Celda 4	
Días	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per
0	0.008	0.010	0.026	0.026	0.013	0.021	0.015	0.029
1		0.009		0.009		0.016		0.015
3		0.007		0.002		0.023		0.028
5		0.002		0.002		0.025		0.021
7		0.002		0.001		0.118		0.005
10		0.002		0.001		0.094		0.027
12		0.003		0.001		0.166		0.027
14		0.003		0.004		0.220		0.042
17		0.006		0.006		0.194		0.022
19		0.002		0.017		0.206		0.056
21		0.001		0.019		0.138		0.053
28		0.005		0.024		0.224		0.074
36	0.010	0.005	0.043	0.030	0.141	0.185	0.105	0.071

**Tabla 6.C1** Rapidez de Corrosión (mm/año).

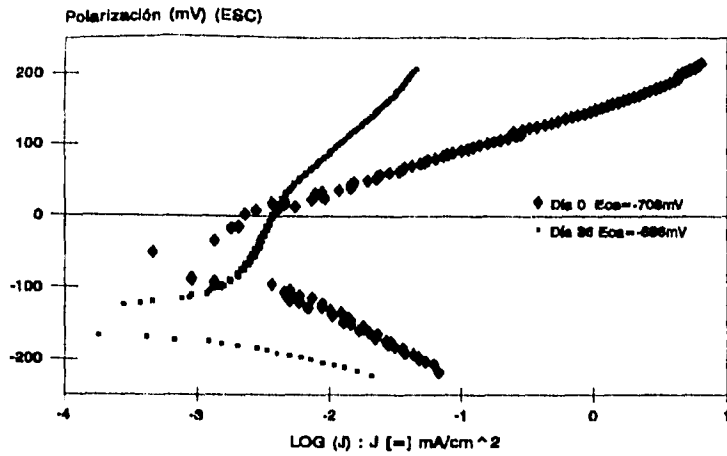


Fig. 6.C7 Pendientes de Tafel  
(Celda C1).

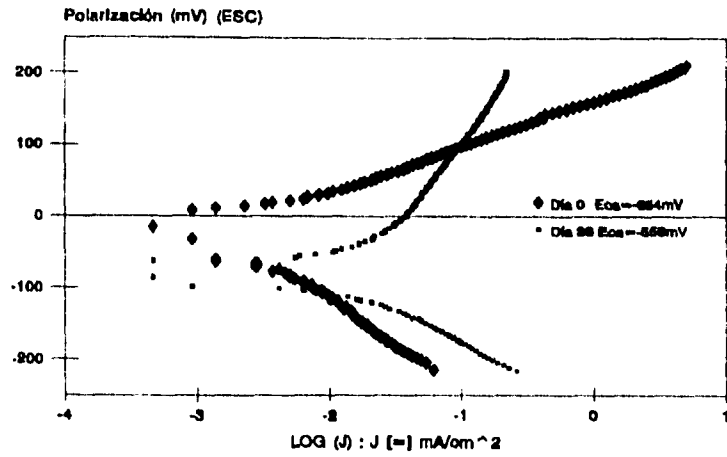


Fig. 6.C8 Pendientes de Tafel  
(Celda 3).

En la gráfica 6.C9 puede verse que los electrodos de las celdas con microorganismos 3 y 4, presentan mínimas variaciones de rapidez de corrosión a partir del séptimo día, 0.16 mm/año y 0.05 mm/año respectivamente; mientras que la celda 2, después de decrecer su rapidez de corrosión a un valor promedio de 0.0015 mm/año entre los días tres y doce, aumenta hasta un valor de 0.029mm/año al término de la prueba. La celda 1 (control), muestra una rapidez de corrosión promedio durante toda la prueba de 0.004 mm/año. Cabe mencionar que la escala de las ordenadas en esta gráfica es logarítmica.

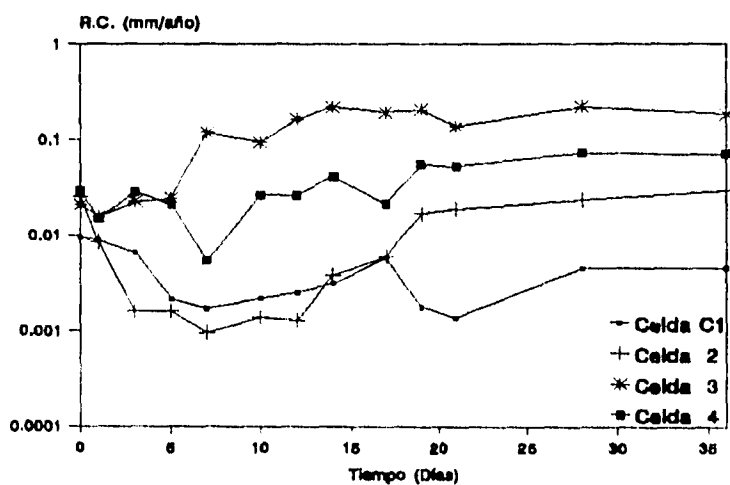


Fig. 6.C9 Rapidez de Corrosión (PT).

### C.3.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.

#### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

En las figuras 6.C10 y 6.C11, se puede ver que las variaciones del potencial a circuito abierto para los electrodos sometidos a mediciones de potencial inicio-final y periódicamente, son muy similares a las obtenidas con los electrodos de las pruebas de Tafel. El comportamiento de estos electrodos en las cuatro celdas para ambas pruebas es similar, en los tres primeros días el potencial se desplaza de manera importante hacia potenciales anódicos, posteriormente los potenciales se mantienen casi constantes hasta el final de la prueba. Al término del experimento, el electrodo de la celda 1 (celda control) presentó el potencial más catódico (-660mV) respecto a las celdas con *Desulfovibrio desulfuricans*.

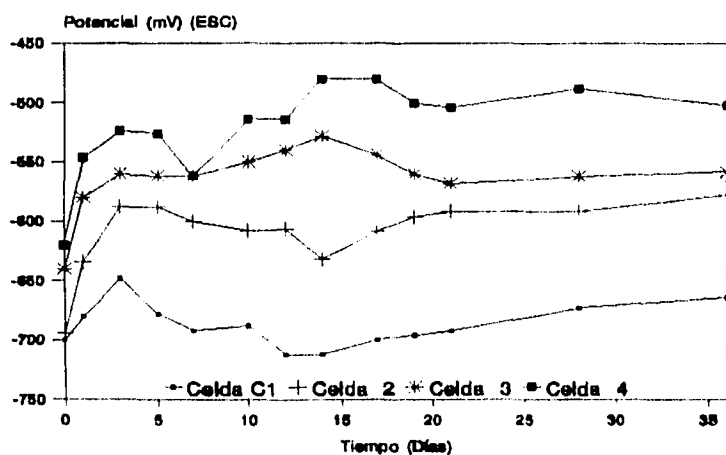


Fig. 6.C10 Potencial a circuito abierto (RP)  
(Inicio-final).

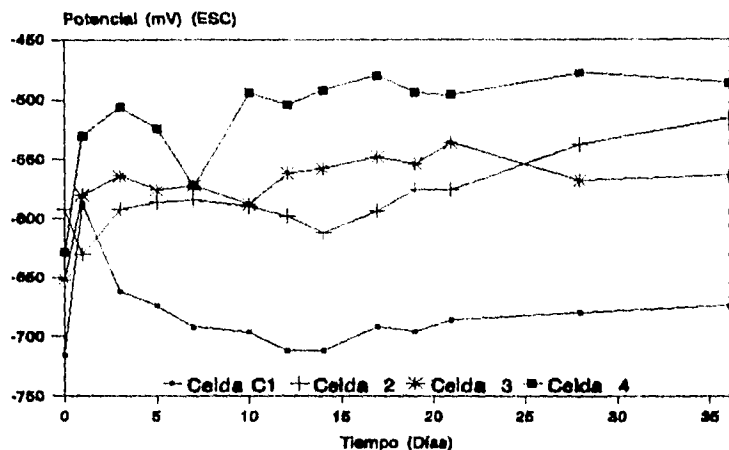


Fig. 6.C11 Potencial a circuito abierto (RP) (Periódico).

#### b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.

Para determinar la rapidez de corrosión mediante la técnica de Resistencia a la Polarización, se siguió la misma metodología que en el experimento A. Para este experimento se obtuvieron 60 gráficas en total (contando electrodos de inicio-final y periódicos de cada celda). Por las razones expuestas en el experimento A únicamente se muestran las gráficas de los barridos de los electrodos periódicos de los días 0 y 36 de la prueba de las celdas 1 (control) y 3 (con microorganismo), figuras 6.C12 y 6.C13 respectivamente.

Los valores de rapidez de corrosión para los electrodos inicio-final y periódicos se calcularon de la misma manera que en el experimento A, éstos se presentan en la tabla 6.C2.



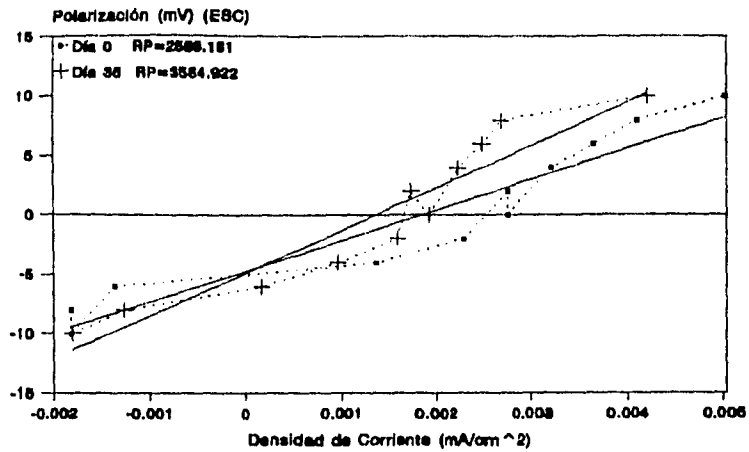


Fig. 6.C12 Resistencia a la Polarización  
(Celda C1).

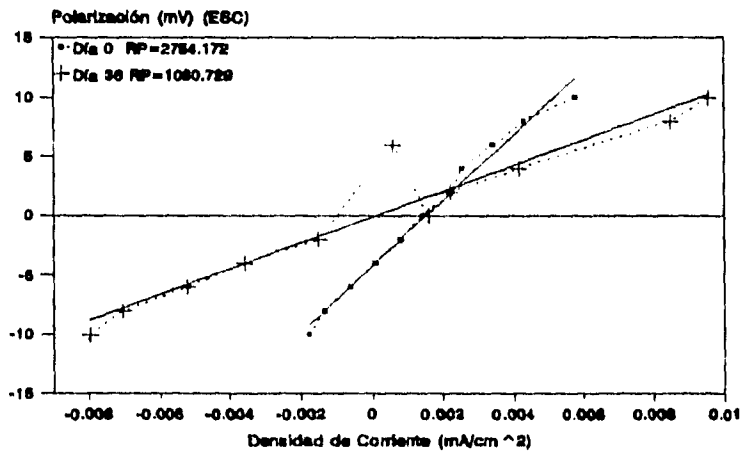


Fig. 6.C13 Resistencia a la Polarización  
(Celda 3).

En la figura 6.C14 se muestra que el comportamiento de los electrodos periódicos de las celdas con microorganismos 2, 3 y 4 es similar entre sí; durante los primeros siete días la variación de la rapidez de corrosión es mínima. En la etapa intermedia de la experimentación se presenta un comportamiento en forma de zig-zag, en la que se alcanzan los valores más grandes de rapidez de corrosión; la celda 3 presentó la rapidez de corrosión mayor, alcanzando un valor aproximado a 0.53 mm/año el día 17, mientras que la celda 2 presentó menor rapidez de corrosión, alcanzando un máximo de 0.22 mm/año el día 19; en la etapa final de la prueba las celdas 3 y 4 sufrieron una disminución de la rapidez de corrosión, mientras que la celda 2 presentó un aumento significativo alcanzando una rapidez de corrosión de 0.27 mm/año. La celda 1 (control) tuvo un comportamiento regular a lo largo de toda la prueba, presentando una rapidez de corrosión promedio de 0.08 mm/año.

Tiempo Días	Celda 1		Celda 2		Celda 3		Celda 4	
	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per	I-F	Per
0	0.087	0.071	0.085	0.099	0.079	0.079	0.079	0.084
1		0.097		0.069		0.145		0.140
3		0.053		0.065		0.186		0.090
5		0.140		0.047		0.139		0.245
7		0.162		0.115		0.153		0.070
10		0.092		0.039		0.397		0.326
12		0.047		0.053		0.517		0.239
14		0.161		0.052		0.416		0.249
17		0.065		0.136		0.530		0.186
19		0.023		0.219		0.411		0.197
21		0.060		0.121		0.279		0.185
28		0.039		0.124		0.386		0.187
36	0.098	0.044	0.308	0.273	0.491	0.334	0.175	0.117

Tabla 6.C2 Rapidez de Corrosión (mm/año).

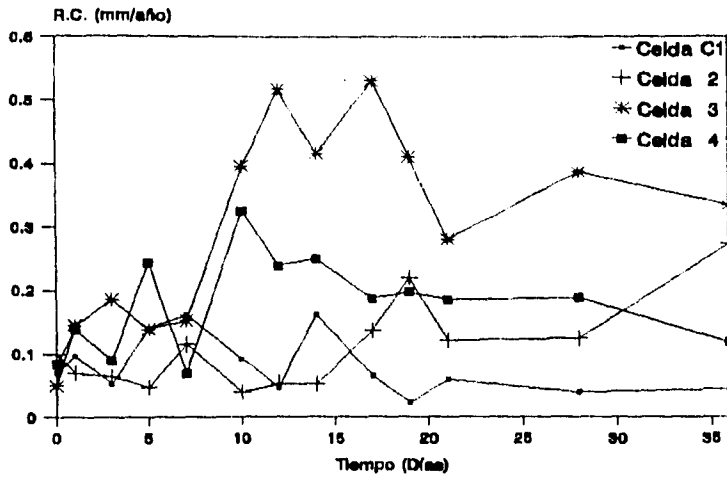


Fig. 6.C14 Rapidez de Corrosión (RP).

## C.4 MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

En esta prueba se verificó el resultado de exponer dos piezas de acero A.I.S.I. 1010, una en agua de mar sin bacterias y otra en agua de mar con bacterias sulfato reductoras. Se observa que el agua de mar sola, provoca pequeñas picaduras en la superficie del material (foto 6.C1), mientras que el medio con bacterias también causa picaduras en el material, pero de mucho mayor tamaño (foto 6.C2). De forma cualitativa, se puede decir que las bacterias provocan un ataque más agresivo en el material.

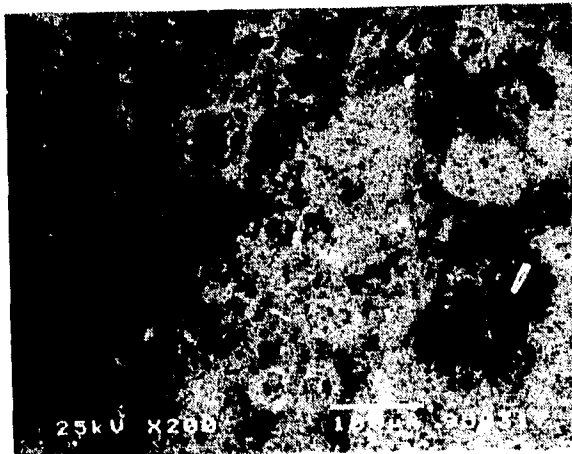


Foto 6C.1 Efecto del agua de mar sobre la pieza de acero.

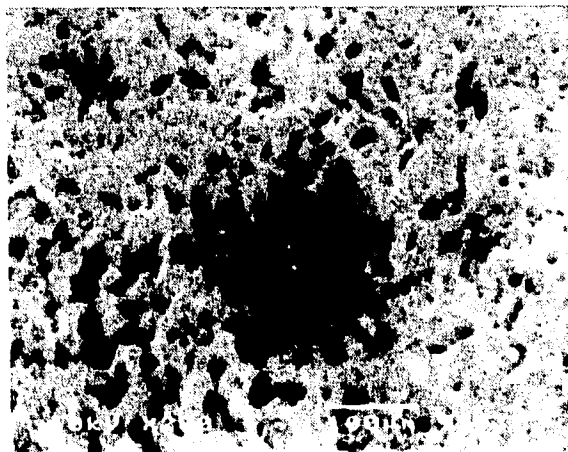


Foto 6C.2 Efecto de la bacteria *D. desulfuricans* sobre la pieza de acero.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL EXPERIMENTO C.

### C.I ASPECTOS MICROBIOLÓGICOS.

La temperatura es un factor muy importante en el crecimiento de las bacterias y a pesar de que la mezcla de sulfato reductoras no se mantuvo en la temperatura óptima de crecimiento, su crecimiento resultó satisfactorio, como se puede observar en la curva de crecimiento (Fig. 6.C3).

La curva de crecimiento obtenida mediante la técnica nefelométrica da como resultado un número mayor al que se obtendría por la cuenta de bacterias viables; sin embargo por las características del medio la aproximación se considera buena.

El producto principal del metabolismo de las bacterias sulfato reductoras es ácido ( $H_2S$ ), ésta es una de las causas del decremento del pH en los primeros días (Fig. 6.C2); el aumento del pH en los días posteriores se debe a la producción de iones hidroxilo ( $OH^-$ ) como resultado de la despolarización causada por la misma bacteria.

La actividad de las bacterias en estudio se mostró en la figura 6.C4, en ella se ve que la degradación del sulfato de

## C.II ASPECTOS ELECTROQUÍMICOS.

### C.II.1. PENDIENTES DE TAFEL.

#### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

El comportamiento del potencial a circuito abierto es similar entre los electrodos a los que se les realizaron las lecturas inicio-final y periódicas (Fig. 6.C5 y Fig.6.C6 respectivamente). Al igual que en los experimentos anteriores, los potenciales a circuito abierto adquiridos el día cero difieren entre sí, debido a que las superficies de los electrodos no son idénticas, las diferencias son atribuidas al pulido y a los defectos de fabricación del acero (Foto 6.A3). En las figuras mencionadas se observa que las celdas con microorganismos presentaron potenciales más anódicos que la celda control.

En general, en el potencial a circuito abierto no se registraron variaciones muy grandes a lo largo del experimento pero las más importantes se presentaron durante los cinco primeros días, coincidiendo con la fase exponencial de la curva de crecimiento. La estabilidad observada en el potencial a circuito abierto puede atribuirse a que el medio de cultivo por ser muy conductor no permite que se presenten problemas de difusión y caída óhmica.

#### b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.

La forma de la curvas para obtener las pendientes de Tafel, pueden observarse en las figuras 6.C7 y 6.C8; éstas cambian

conforme transcurre el tiempo de experimentación. Al inicio de la prueba las curvas que se obtienen son de la forma típica de las pendientes de Tafel, los barridos anódico y catódico son prácticamente líneas rectas (control mixto), que se modifican al paso del tiempo hasta obtener las curvas similares a las del día 36.

En ausencia y presencia de microorganismos al término del experimento (día 36) se obtiene una pendiente mayor en la recta anódica (Fig. 6.C7 y 6.C8 respectivamente), esto nos permite ver que el control en la superficie del electrodo cambia de un control mixto a un control anódico. Las curvas obtenidas de los barridos realizados en los electrodos de inicio-final presentan un comportamiento similar al obtenido en los barridos hechos en los electrodos periódicos. Por las mismas razones expuestas en el experimento A, sólo se presentaron las gráficas más representativas.

La variación de rapidez de corrosión se muestra en la figura 6.C15, en ella puede verse que no hay un comportamiento uniforme entre los electrodos periódicos las celdas, encontrando variaciones hasta del 380% de variación.

Al relacionar la rapidez de corrosión y número de bacterias contra el tiempo de experimentación se encontró que no hay un comportamiento definido entre estos parámetros respecto al tiempo, figuras 6.C16, 6.C17 y 6.C18, en cambio sí hay una relación más clara de la rapidez de corrosión con el logaritmo del número de bacterias por mililitro (a mayor logaritmo → mayor rapidez de corrosión), esta relación se puede observar en la figura 6.C19. En la figura anterior se aprecia que la rapidez de corrosión comienza a aumentar de manera importante al alcanzar un valor de logaritmo de entre 8.6 a 9.0

( $400 \times 10^6$  y  $1000 \times 10^6$  bacterias/ml respectivamente). La rapidez de corrosión final es proporcional a la cantidad de bacterias presentes en la celda correspondiente. La relación encontrada entre rapidez de corrosión y el logaritmo del número de bacterias/ml puede servir como base para trabajos posteriores donde el objetivo sea encontrar una ecuación matemática que relacione estos parámetros, pero tomando en cuenta el número de bacterias viables presentes en cada celda en lugar de la aproximación de ellas (nefelometría) como en este caso.

Al igual que en los experimentos anteriores, al comparar la rapidez de corrosión que presentaron los electrodos inicio-final y periódicos se encontró que la rapidez de corrosión en los electrodos inicio-final fue mayor.

En la tabla 6.C3 se presenta el porcentaje de variación de rapidez de corrosión de los electrodos inicio-final y periódicos entre los días 0 y 36.

Prueba	Celda C1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
	% Variación de Rapidez de Corrosión			
Inicio-Fin	31.39	63.04	974.34	606.23
Periódico	-52.23	14.67	782.89	14.04

Donde el signo negativo indica decremento en la rapidez de corrosión.

Tabla 6.C3 % Variación de Rapidez de Corrosión.



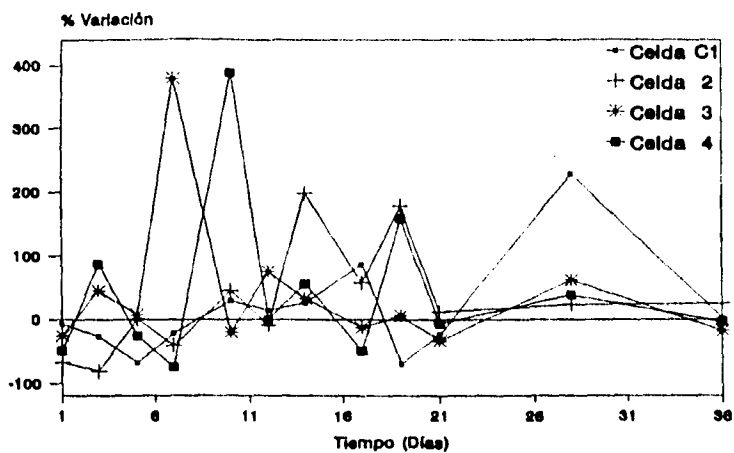


Fig. 6.C15 Variación de la Rapidez de Corrosión (PT).

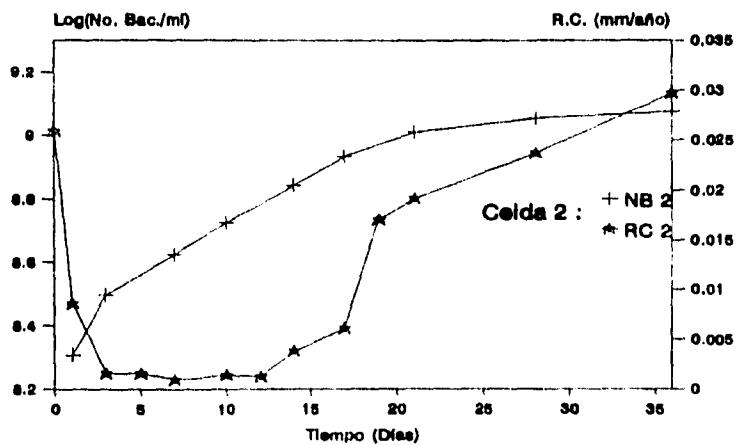


Fig. 6.C16 Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (PT) vs. Tiempo.

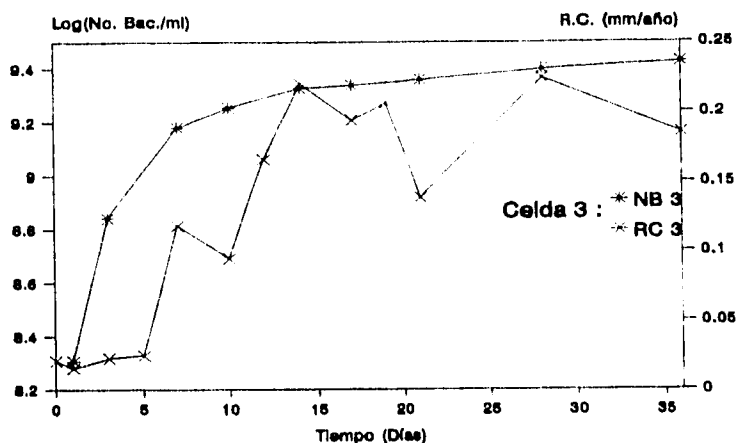


Fig. 6.C17 Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (PT) vs. Tiempo.

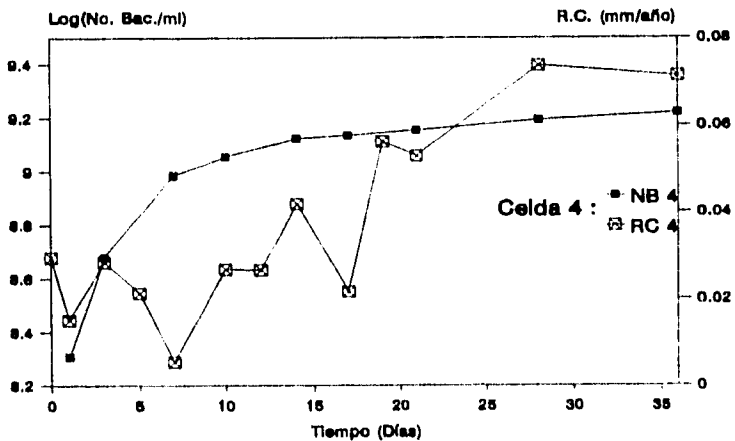


Fig. 6.C18 Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (PT) vs. Tiempo.

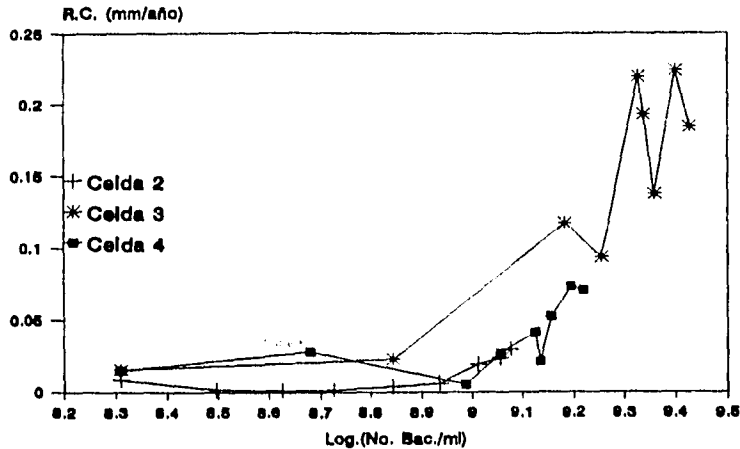


Fig. 6.C19 Rapidez de Corrosión (PT) vs. No. de Bacterias/ml.

## C.II.2 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.

### a. POTENCIAL A CIRCUITO ABIERTO.

El comportamiento del potencial a circuito abierto es similar entre los electrodos a los que se les realizaron las lecturas inicio-final y periódicas (Fig. 6.C10 y Fig.6.C11 respectivamente). Los potenciales a circuito abierto adquiridos el día cero también difieren entre sí, debido a las razones explicadas anteriormente. En las figuras mencionadas se observa que las celdas con microorganismos presentaron potenciales más anódicos que la celda control, debido a la acción microbiana en la biopelícula. Estas gráficas son similares a las obtenidas con la técnica de PT.

Las variaciones importantes en los potenciales a circuito abierto se registran principalmente durante la fase exponencial de la curva de crecimiento.

#### b. RAPIDEZ DE CORROSIÓN.

Los datos experimentales obtenidos de los barridos de potencial se ajustaron aceptablemente a una línea recta, la cual pierde linealidad conforme transcurre el tiempo de experimentación, esto se puede observar en las figuras 6.C12 y 6.C13. Este comportamiento se observa claramente en la figura 6.C20, donde se ve que las celdas con microorganismos mantienen su correlación muy cercana a uno, mientras que la celda control muestra una desviación ligeramente mayor debido posiblemente a la formación de una capa de óxido, que es más compacta que la biopelícula que tiene un carácter dinámico en las celdas con microorganismos.

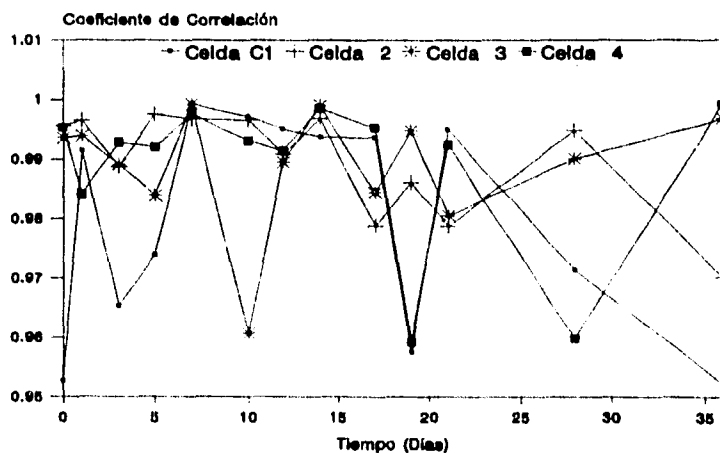
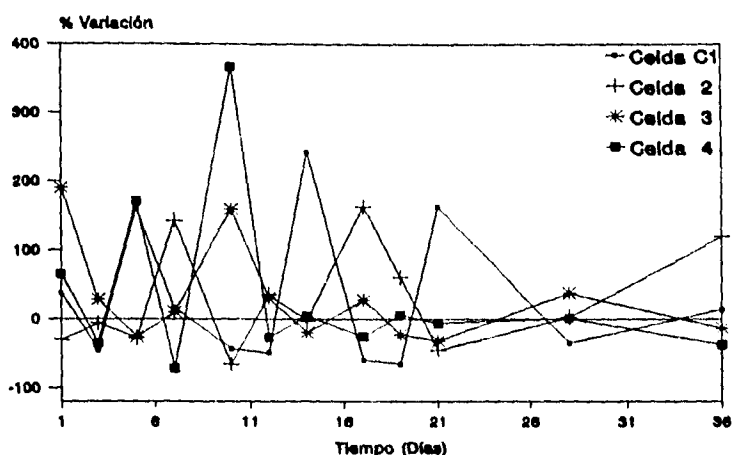


Fig. 6.C20 Variación del Coeficiente de Correlación (RP).

En la rapidez de corrosión de los electrodos periódicos sometidos a RP se presentaron variaciones importantes a lo largo de toda la experimentación, lo que indica que no hay un comportamiento uniforme entre las celdas, esto se ve claramente en la figura 6.C21.



**Fig. 6.C21 Variación de la Rapidez de Corrosión (RP).**

En este caso la relación de la rapidez de corrosión y número de bacterias contra el tiempo de experimentación se presenta en las figuras 6.C22, 6.C23 y 6.C24 para las celdas 2, 3 y 4 respectivamente. Para las celdas 3 y 4 se observa que la rapidez de corrosión hasta la fase estacionaria de la curva de crecimiento presenta cambios constantemente, posteriormente en ambas celdas la rapidez de corrosión presenta un decremento, debido a un efecto pasivante al recubrirse la superficie de los electrodos por la biopelícula y productos de corrosión. La

celda 2 es la que presenta menor número de bacterias (Fig. 6.C22) se observa que en los primeros 15 días la rapidez de corrosión disminuye respecto a la rapidez de corrosión inicial, posteriormente durante la fase estacionaria se presenta una tendencia al incremento de la rapidez de corrosión atribuible al mayor número de bacterias durante esta etapa final.

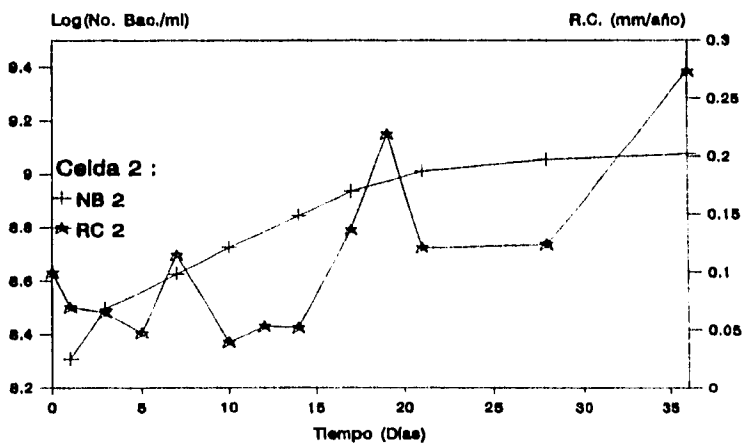
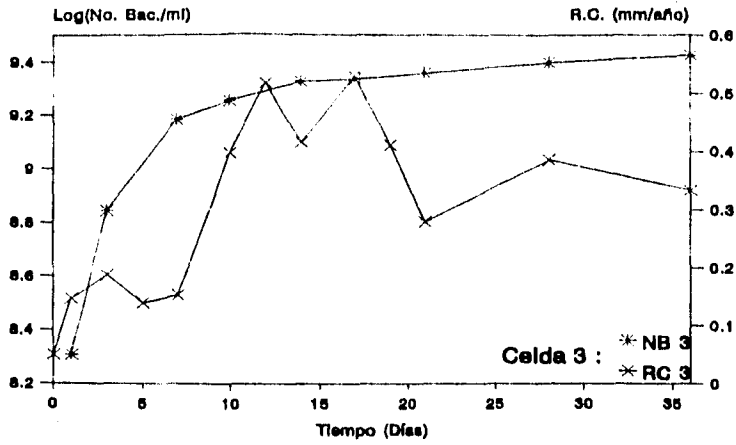
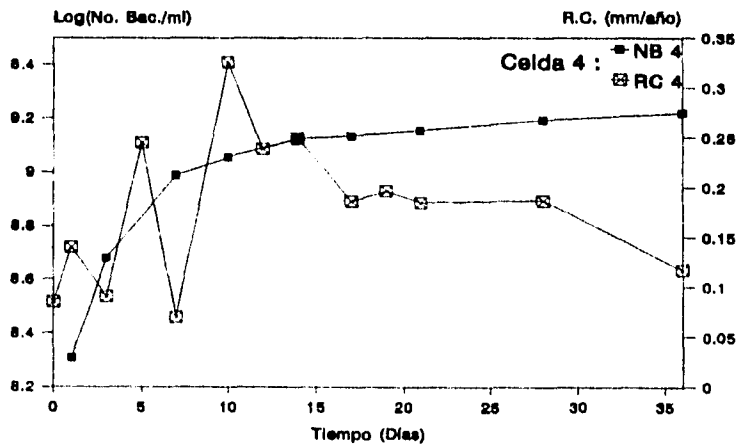


Fig. 6.C22 Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.



**Fig. 6.C23** Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.



**Fig. 6.C24** Curva de Crecimiento (Nefelometría) y Rapidez de Corrosión (RP) vs. Tiempo.

La relación entre rapidez de corrosión y el logaritmo de la concentración bacteriana se representa en la figura 6.C25, se observa un comportamiento similar que en la técnica de PT.

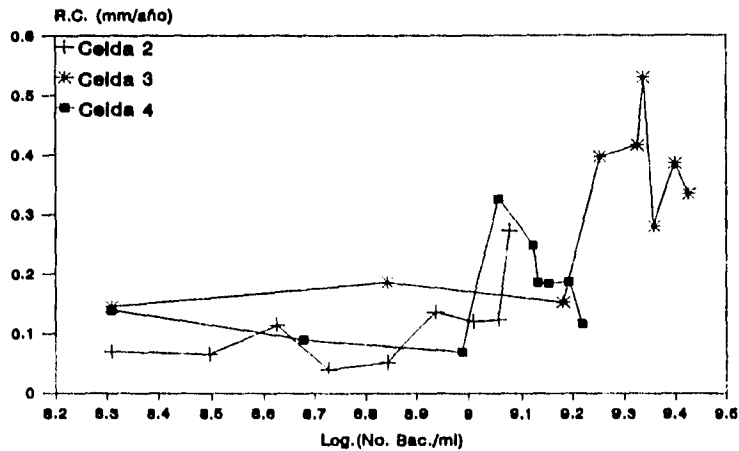


Fig. 6.C25 Rapidez de Corrosión (RP) vs. No. de Bacterias/ml.

Al comparar la rapidez de corrosión que presentaron los electrodos inicio-final y periódicos se encontró que la rapidez de corrosión en los electrodos inicio-final fue mayor. En la tabla 6.C4 se presenta el porcentaje de variación de rapidez de corrosión de los electrodos inicio-final y periódicos entre los días 0 y 36.



Prueba	Celda C1	Celda 2	Celda 3	Celda 4
	% Variación de Rapidez de Corrosión			
Inicio-Fin	12.51	261.81	523.63	120.54
Periódico	-37.12	175.17	321.56	38.55

Donde el signo negativo indica decremento en la rapidez de corrosión.

**Tabla 6.C4** % Variación de Rapidez de Corrosión.

### C.III MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

De la comparación entre las fotografías de antes y después de la exposición de las piezas de acero A.I.S.I. 1010 al medio corrosivo, se ratifica que las bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) inducen una corrosión por picadura (Foto 6.C1). Se observa que el medio de cultivo por si solo provoca pequeñas picaduras en la superficie del acero (Foto 6.C2), este efecto es un factor que contribuye al proceso de corrosión por picadura ya que proporciona lugares ideales para que las colonias de bacterias se establezcan e induzcan un grado de corrosión mayor. Comparando las fotografías 6.A1, 6.B2 y 6.C1 se observa que el medio de cultivo más agresivo fue agua de mar, ya que por si sola causa pequeñas picaduras en el metal.

## 6.IV DISCUSIÓN GLOBAL.

En general, no se encontró una relación directa entre el potencial a circuito abierto y la rapidez de corrosión. Esto se ve claramente en las gráficas de potenciales a circuito abierto de cada uno de los experimentos. De acuerdo con la teoría, a un potencial libre de corrosión más anódico se esperaría una corrosión mayor, pero por ejemplo para los experimentos A en todos los casos y B en los casos inicio-final, la celda control presentó potenciales a circuito abierto más anódicos que las celdas con microorganismos, lo cual nos indicaría que los electrodos sumergidos en medio de cultivo presentan una corrosión más severa que los electrodos que se encuentran en presencia de microorganismos, pero al realizar el estudio de rapidez de corrosión con alguna de las técnicas mencionadas se encontró que la celda control, contrario a lo que nos dicen los potenciales a circuito abierto, presentó valores de rapidez de corrosión menores que cualquiera de las celdas con bacterias. El comportamiento que presentan los potenciales a circuito abierto se atribuye a la formación de la biopelícula en la superficie de los electrodos, que le da una aparente pasivación al metal, pero en realidad no se tiene tal pasivación ya que no se trata de un recubrimiento inmóvil, más bien se tiene un recubrimiento dinámico que se rige por la actividad de las bacterias, las cuales influyen en la aceleración de la corrosión.

Las celdas con menor concentración de bacterias, al inicio del experimento, tuvieron un comportamiento de rapidez de corrosión semejante a la celda control y a mayor

concentración de bacterias las celdas presentaron una tendencia diferente al de la celda control, pero análogo entre sí.

Analizando el comportamiento del acero expuesto a diferentes medios corrosivos en presencia de microorganismos, se observó que el medio de cultivo juega un papel muy importante en el estudio de los potenciales a circuito abierto; por ejemplo, en los experimentos B y C se trabajó con la misma bacteria (*Desulfovibrio desulfuricans*) pero en diferentes medios de cultivo, obteniéndose un comportamiento del potencial a circuito abierto diferente, por lo que se puede decir que es muy importante la selección de un medio de cultivo adecuado para el estudio. Por lo mencionado anteriormente, parece ser que un estudio que contemple únicamente la medición de potenciales a circuito abierto como indicador del grado de corrosión del material podría conducir a una interpretación equivocada del proceso.

Si se realiza una comparación entre los valores de rapidez de corrosión que se obtuvieron en el experimento a condiciones aerobias con *Pseudomonas aeruginosa* (Experimento A) y el experimento a condiciones anaerobias con *Desulfovibrio desulfuricans* (Experimento C), se nota que el microorganismo anaerobio induce una corrosión más severa que el aerobio. En la figura 6.D1 se presenta la comparación de la rapidez de corrosión obtenida mediante la técnica de Pendientes de Tafel, en ésta se representan los valores de las celdas C1 (control) y las celdas 3 (con microorganismos) de los experimentos A y C; se aprecia que en los primeros siete días la corrosión en el medio aerobio (Experimento A) es mayor debido a la formación de celdas de aireación a diferencia del medio anaerobio (Experimento C) en que la rapidez de corrosión depende principalmente de la cantidad de productos metabólicos

desechados por los microorganismos, notándose este efecto a partir del décimo día. La figura 6.D2 se presenta la comparación de la rapidez de corrosión obtenida mediante la técnica de Resistencia a la Polarización, en esta se representan los valores de las celdas C1 (control) y las celdas 4 y 3 (con microorganismos) de los experimentos A y C, en ésta se observa un comportamiento similar al descrito anteriormente.

En general, las bacterias *Pseudomonas aeruginosa* aumentan el grado de corrosión entre 1.3 y 9 veces con respecto a su medio de cultivo, mientras que las bacterias *Desulfovibrio desulfuricans* modifican entre 7.5 y 70 veces; las bacterias *Desulfovibrio desulfuricans* producen un grado de corrosión de entre 1.5 y 8 veces más severo que el que inducen las bacterias *Pseudomonas aeruginosa*; cabe aclarar que esta última comparación se realiza entre bacterias que tienen medios de cultivo diferentes.

En los tres experimentos se observó que los electrodos sometidos a una polarización periódica (en ambas técnicas, RP y PT), exhibieron una rapidez de corrosión entre 1.5 y 3 veces menor, con respecto a los electrodos sometidos a una polarización al inicio y otra al final; a su vez la magnitud de la rapidez de corrosión estimada con PT es menor que la obtenida con RP. Esta situación puede llevar a errores de apreciación al medir una rapidez con PT que la que realmente se tiene en el sistema. Sin embargo, con un estudio que contemple polarizaciones periódicas y las pruebas microbiológicas, puede conocerse la relación Rapidez de Corrosión-Concentración Bacteriana a través del tiempo.

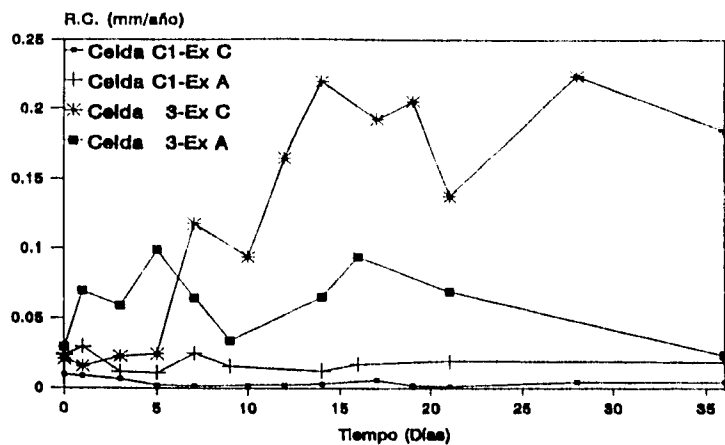


Fig. 6.D1 Comparación de la Rapidez de Corrosión (PT) en Medio Aerobio y Anaerobio.

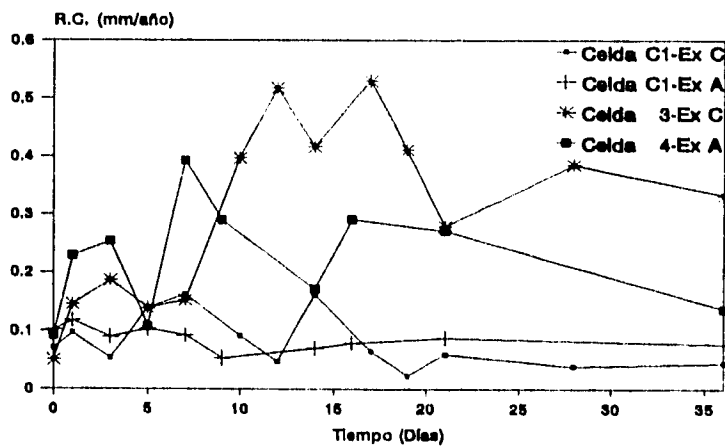


Fig. 6.D2 Comparación de la Rapidez de Corrosión (RP) en Medio Aerobio y Anaerobio.

En la tabla 6D.1 se comparan las características de ambas técnicas, con la finalidad de resaltar las bondades de cada una de ellas. Como se ve la técnica de RP necesita una menor inversión en equipo, menor horas/hombre de trabajo para obtener y procesar datos, además por tener un intervalo menor de polarización el sistema microbiológico se altera menos, logrando una semejanza mayor con un sistema real.

Parámetros de Comparación	Resistencia a la Polarización (RP)	Pendientes de Tafel (PT)
Intervalo de Polarización	-10mV , 10mV	-200mV , 200mV
No. de Lecturas	10-20	150-200
Equipo Necesario	Potenciostato, multímetro, reloj	Potenciostato, interfase para PC
Tiempo para efectuar las lecturas	15-20min	Con PC: 15min Sin PC: 1.5h
Posibles problemas durante la lectura	Ninguno	Sobrecarga del Potenciostato
Información extra necesaria	Pendientes de Tafel del sistema	Ninguna
Tratamiento de datos para R.C.	3 pasos	5 pasos
Variación de magnitud de R.C.	RP/PT = 3-8 veces para <i>Pseudomonas a.</i> RP/PT = 4-13 veces para Sulfato reductoras en Agua de Mar	

Tabla 6D.1 Comparación de Técnicas.

El estudio de microscopía electrónica resulta muy útil en este tipo de investigaciones porque permite conocer la forma de ataque, tanto del medio como de las bacterias. Se corroboró que para las bacterias *Pseudomonas aeruginosa* y *Desulfovibrio desulfuricans* el ataque al material en estudio (acero A.I.S.I. 1010) es localizado y que algunos medios de cultivo como el agua de mar por sí mismos pueden promover éste tipo de corrosión.

En un sistema real (condensadores, tuberías, etc. con población bacteriana), en el que se da la corrosión aerobia, cuando no se ha recubierto totalmente con la biopelícula, se tienen colonias que producen celdas de aireación que promueven una degradación más rápida del material. Esto nos conduce a suponer que los valores de la rapidez de corrosión se comportarían como en la fase exponencial del experimento A (máximos y mínimos); una disminución en la población bacteriana no atenuaría en forma importante la rapidez de corrosión, teniendo que eliminar los depósitos orgánicos para evitar las celdas de aireación. En el caso de la corrosión anaerobia, la concentración bacteriana es la causante directa del grado de corrosión, debido a que los desechos metabólicos de ellas son los promotores de la corrosión, si se registra una disminución en la concentración bacteriana la rapidez de corrosión también disminuirá.

La gran mayoría de las industrias puede verse involucrada en el problema de corrosión inducida por microorganismos, ya que éstos son muy adaptables a las diversas condiciones ambientales. La forma en que pueden verse afectadas estas industrias varía desde un picado en las tuberías hasta alterar el funcionamiento de un equipo (tanques, condensadores, maquinas de aceite, sistemas de agua de enfriamiento, etc.)

ocasionando un paro parcial en la producción trayendo como consecuencia importantes repercusiones económicas.

En base a la bibliografía consultada y al estudio realizado, podemos decir que el problema de corrosión microbiológica puede ser muy severo y sería mucho más sencillo y menos costoso prevenirlo que corregirlo.



## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

---

## CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos puede verse que realizar una cuenta de bacterias viables es lo más adecuado para relacionar concentración bacteriana-rapidez de corrosión, cuando ésta no pueda realizarse la lectura nefelométrica puede dar una buena aproximación si el medio de cultivo no presenta precipitados o turbidez.

Se observó que si el medio de cultivo tiene un alto contenido de proteínas, la realización de la pruebas electroquímicas (principalmente con PT) presentan problemas en la lectura de corriente y potencial.

La biopelícula que se forma en la superficie de los electrodos al parecer no presenta característica protectoras, ya que el grado de corrosión es mayor en éstos, que en los electrodos de las celdas control.

Las pruebas de actividad y microscopía electrónica fueron de gran utilidad para verificar que son las bacterias, en este caso *Pseudomonas aeruginosa* y *Desulfovibrio desulfuricans* las que inducen la corrosión localizada.

Parece ser que medir únicamente potenciales de reposo como indicador del grado de corrosión del material podría conducir a una interpretación equivocada del proceso.

El comportamiento en las pruebas de potencial de reposo y las lecturas iniciales y finales de la rapidez de corrosión de los electrodos de inicio-final fue muy semejante a los electrodos periódicos; se obtuvo un grado de corrosión superior en las pruebas de inicio-final que en las periódicas.

Coincidiendo con la literatura sobre el tema, en este caso también se encontró que la corrosión anaerobia inducida por la bacteria anaerobia *Desulfovibrio desulfuricans* es más severa que la corrosión aerobia producida por la bacteria aerobia *Pseudomonas aeruginosa*.

La técnica de RP presenta mayores ventajas sobre la técnica de PT; una ventaja muy importante es la de alterar menos al sistema biológico, logrando una semejanza mayor con un sistema real.

## RECOMENDACIONES.

De la experiencia adquirida durante este trabajo, podemos dar las siguientes recomendaciones:

- a. Debe trabajarse siempre con asepsia, por seguridad personal y para evitar la contaminación de los cultivos, asegurando así que el efecto de la corrosión sea provocado por las bacterias en estudio y no por un cultivo no axénico.

b. La aguja de muestreo debe colocarse lo más cerca de los electrodos de trabajo para poder cuantificar la concentración bacteriana en las proximidades del electrodo de trabajo y así tener idea de la cantidad de bacterias en los alrededores de la biopelícula.

c. En la elaboración de los electrodos de trabajo, la resina debe dejarse endurecer perfectamente, de 48 a 72 horas. Se deben pulir las superficies de los electrodos de una manera uniforme (pulir describiendo un "ocho") para tener potenciales al inicio semejantes.

d. Al colocar los electrodos de trabajo en las celdas, la superficie pulida debe quedar orientada hacia arriba para tener un crecimiento de la biopelícula y lo más cerca al electrodo de referencia.

e. Para evitar problemas de difusión, lo más recomendable es no utilizar medios con alto contenido de proteínas, debido a que se descomponen con mucha facilidad y su preparación puede resultar difícil si no se cuenta con la práctica necesaria en éste campo.

f. En el estudio de corrosión microbiológica inducida por *Desulfovibrio desulfuricans* es difícil conseguir homogeneidad en los tubos de viabilidad, esto hace sumamente difícil la cuenta de colonias bacterianas, por esta razón consideramos más apropiado hacer un vaciado en cajas de Petri e incubar en anaerobiosis, por ejemplo se pueden utilizar los sobres de *Anaerocult P* de *Diagnóstica Merck*, *GasPak anaerobic System*, etc.

- g.** Para asegurar anaerobiosis en las celdas en las que así se requiera, es recomendable una mezcla  $\text{CO}_2$  +  $\text{N}_2$  (20% - 80%).
- h.** Como tiempo mínimo de experimentación sugerimos 20 días, ya que en los primeros 15 días se observa la mayor actividad microbiológica y por consecuencia electroquímica.
- i.** En los trabajos subsecuentes de corrosión inducida por éstas bacterias u otras, puede seguirse la metodología propuesta en este trabajo para probar recubrimientos anticorrosivos o biocidas que no formen compuestos carcinógenos, tales como los trihaloorgánicos.
- j.** Para tener la seguridad de que se tiene un material con las especificaciones reportadas por el fabricante es conveniente realizar un estudio metalográfico de dicho material.

# **APÉNDICE 1**

## **ELABORACIÓN DE LAS CELDAS DE CORROSIÓN**

---

## **1A. PREPARACIÓN DE LOS ELEMENTOS PRESENTES EN LAS CELDAS DE CORROSIÓN.**

Para la construcción de las celdas de corrosión fue necesaria la preparación de cada uno de los elementos presentes en éstas.

Como primer paso se elaboraron los electrodos de trabajo y los electrodos para medir pH, a continuación se describe el procedimiento para su fabricación.

### **a. ELABORACIÓN DE LOS ELECTRODOS DE TRABAJO.**

**PREPARACIÓN DEL ACERO.** Se utilizó una varilla de acero A.I.S.I. 1010 de forma cuadrada de 0.5cm de lado, la cual se cortó en segmentos de aproximadamente 1.5 cm de longitud; a continuación se devastaron para conseguir un ángulo recto entre la cara y el cuerpo del acero. Cada segmento fue perforado en

**PREPARACIÓN DE LA RESINA.** La preparación de la resina consistió en mezclar 80% de Araldite (Resina Araldite D Rem 001) y 20% de endurecedor (Endurecedor HY 956) de Ciba-Geigy. Se obtiene un líquido blanco viscoso.

**FABRICACIÓN DE LOS ELECTRODOS.** Se introduce el segmento de acero preparado anteriormente en el molde, fijándolo en el centro de la cera de campeche, una vez que éste está fijo y centrado se vierten aproximadamente 2ml de resina, teniendo cuidado de no formar burbujas y manteniendo el cable en posición vertical. Se fijan los moldes en una gradilla (Foto 4) y se deja endurecer la resina por 48 horas; una vez transcurrido ese tiempo se retira la cera de campeche y se expulsa el electrodo. Se pule la superficie del electrodo en forma de ocho sobre una liga de No. 400 procurando obtener un acabado uniforme resina-acero (Foto 5).

Para fijar los electrodos de trabajo y darles la dirección deseada se introducen en un tubo de vidrio con un ángulo recto de 90°.



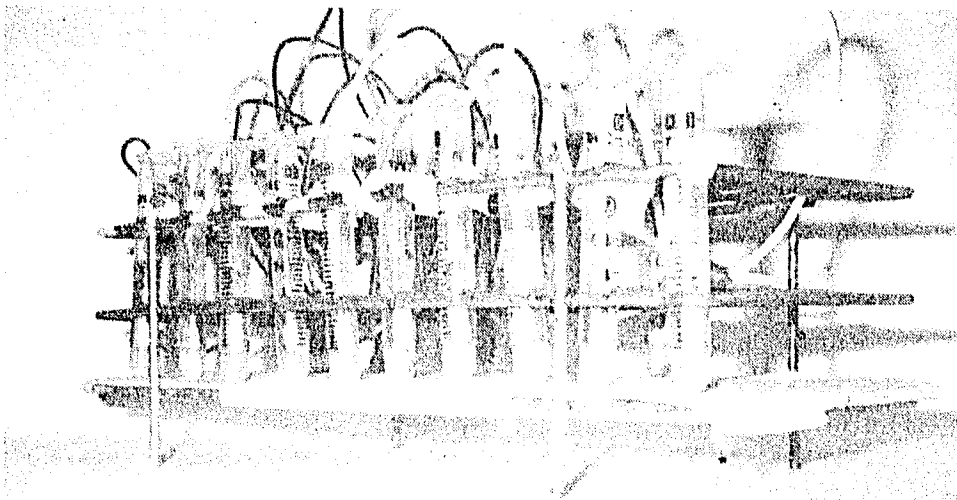


Foto A Gradilla con electrodos de trabajo.

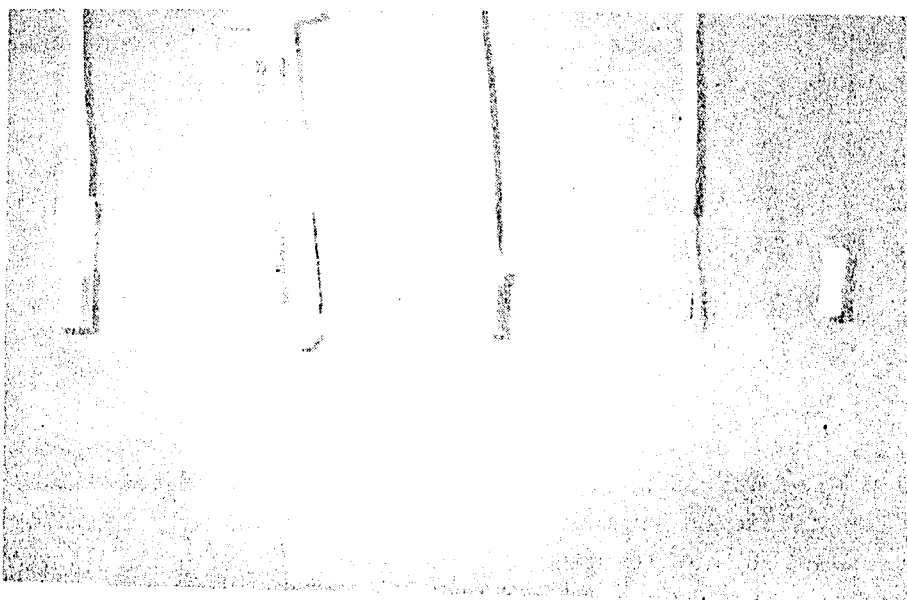


Foto B Elaboración de los electrodos de trabajo.

## **b. ELABORACIÓN DE LOS ELECTRODOS PARA MEDIR pH.**

**PREPARACIÓN DEL ACERO.** Se utilizó una varilla de acero inoxidable A.I.S.I. 316 de 0.8 cm de diámetro la cual se cortó en segmentos de 10 cm. de longitud y se pulieron para obtener una superficie uniforme.

**PREPARACIÓN DE LA DISOLUCIÓN.** La disolución que se utilizó fue  $H_2SO_4$  5M y  $Cr_2O_3$  2.5M.

**PREPARACIÓN DEL ELECTRODO.** Se introduce el segmento de acero en la disolución y se calienta a  $70^\circ C$  por 17 min. Después del baño los electrodos se dejan secar al medio ambiente y a continuación se lavan perfectamente con agua destilada.

## **1B. ELABORACIÓN DE LAS CELDAS DE CORROSIÓN EN AMBIENTE AEROBIO.**

Una vez listos los electrodos de trabajo y los electrodos para medir pH se perforan los tapones para cada una de las celdas con los orificios necesarios para cada uno de los elementos mencionados anteriormente.

Se introduce en el tapón el electrodo auxiliar y las

agujas, procurando que una de ellas penetre totalmente en el tapón de forma que quede sumergida en el medio de cultivo y la otra no.

Los tapones de goma preparados con el electrodo auxiliar y las agujas, los vasos de precipitados, los tubos de vidrio, el tubo látex y los tubos nefelométricos se esterilizan en calor húmedo en autoclave a una presión de 15 lb/in<sup>2</sup> durante 15 minutos.

Los termómetros, los electrodos de trabajo y los electrodos para medir pH son elementos de manejo delicado y no soportan una esterilización en autoclave a las condiciones mencionadas por lo que su esterilización consistió en limpiarlos con alcohol y enjuagarlos con medio de cultivo estéril para retirar los residuos de alcohol.

Una vez que se tienen todos los elementos esterilizados se puede proceder a montar las celdas de corrosión para lo que se hace un campo estéril, como se describió en el capítulo de microbiología, éste se logra limpiando perfectamente el área de trabajo y colocando dos mecheros en los extremos del área elegida.

Dentro del área estéril, se introducen en el tapón los elementos restantes que son: el termómetro, el electrodo de referencia, los electrodos para medir pH y los cuatro electrodos de trabajo, estos últimos se colocan con la superficie del metal hacia arriba y en forma de flor de tal forma que el electrodo de referencia quede en el centro de ellos. Los electrodos de trabajo se deben colocar cerca de la interfase líquido-aire ya que es ahí donde preferencialmente se desarrolla la bacteria.

Aparte se introduce el tubo látex en la boquilla del vaso de precipitados y en el otro extremo del tubo látex se coloca el tubo nefelométrico; se vierten en la celda aproximadamente 400ml de medio de cultivo y se coloca el tapón que se preparó anteriormente.

Lista la celda de corrosión se coloca un tapón de algodón a los orificios de las agujas y en los tubos de vidrio el cual sirve como filtro para la entrada de aire y así evitar la contaminación del medio; para terminar el sellado de la celda se le pone parafilm alrededor de ésta y en las uniones celda-tubo látex-tubo nefelométrico.

Después de sellar las celdas se procede a inocular la bacteria, excepto la celda control, esto es introducir a través de la aguja que se encuentra sumergida en el medio de cultivo 5ml de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* (Foto 6).

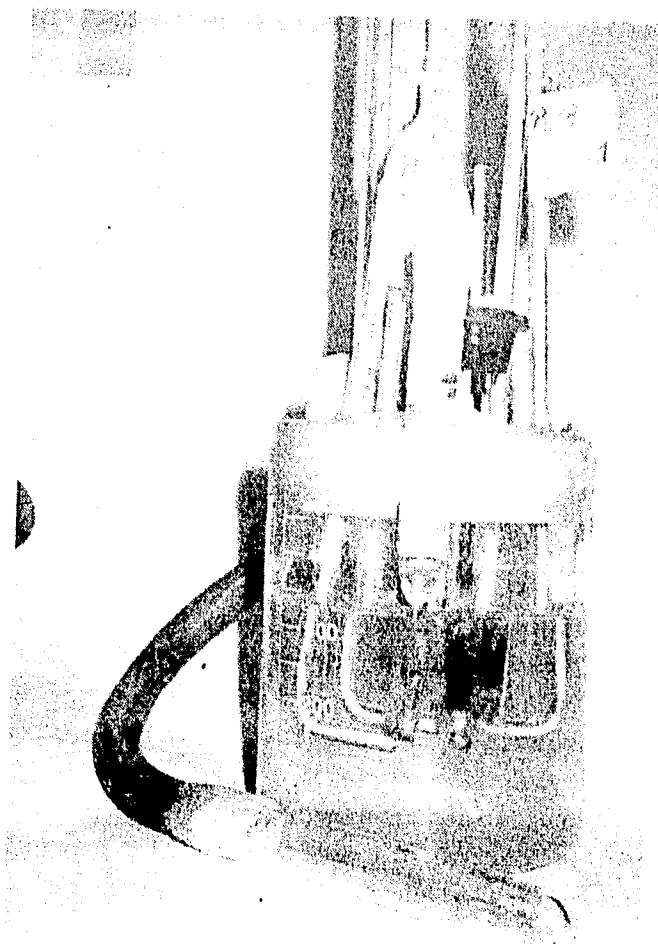


Foto C Celda de corrosión con *Pseudomonas aeruginosa*.

## 1C. ELABORACIÓN DE LAS CELDAS DE CORROSIÓN EN AMBIENTE ANAEROBIO.

El método para montar las celdas en un ambiente anaerobio es idéntico al descrito en el apéndice 1B, pero para este caso las celdas se sellan perfectamente de la forma que a continuación se describe.

Una vez lista la celda con todos los elementos mencionados anteriormente se procede a sellar; puesto que se trata de un ambiente anaerobio es necesario que no haya ninguna entrada de aire por lo que se sella el tapón al vaso con parafina estéril, también se pone parafina en los orificios de los tubos de vidrio, en los alrededores de cada uno de los elementos colocados en el tapón y alrededor de las conexiones del tubo látex con la boquilla de la celda y con el tubo nefelométrico; una vez que la parafina está perfectamente seca se le pone alrededor parafilm; a los orificios de las agujas no se les pone parafina porque son la entrada y salida de nitrógeno y aire respectivamente, además una de las agujas se utiliza para sacar muestras para las pruebas microbiológicas por tal motivo únicamente se les coloca algodón y parafilm procurando que queden perfectamente selladas para evitar fugas por medio de ellas.

Cabe destacar que en estas celdas los electrodos de trabajo deben de colocarse hacia el fondo de la celda debido a que es ahí donde las bacterias anaerobias se desarrollan mejor.

Después de sellar la celda se procede a inocular, excepto la celda control, esto es introducir a través de la

aguja que se encuentra sumergida en el medio 5ml de la mezcla de bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*), inmediatamente después se les burbujea nitrógeno por espacio de 15 min y de esta forma conseguir un ambiente anaerobio (Foto 7).

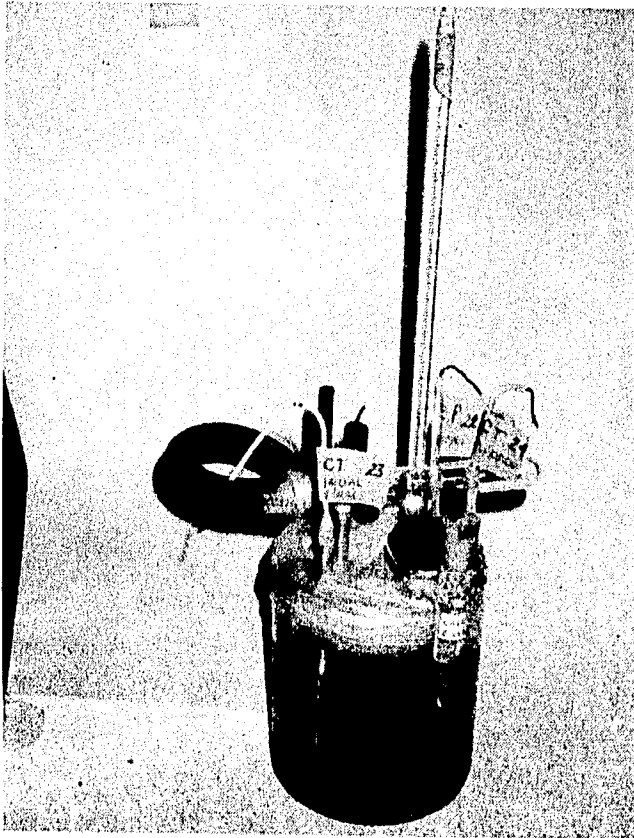


Foto D Celda de corrosión con *Desulfovibrio desulfuricans*.

**APÉNDICE 2**  
**MEDIOS DE CULTIVO**

---



## 2. PREPARACIÓN DE LOS MEDIOS DE CULTIVO PARA CADA AMBIENTE.

Los medios de cultivo para cada uno de los tres experimentos fueron los siguientes:

1. Medio de cultivo específico para *Pseudomonas aeruginosa*.
2. Medio de cultivo ATCC-modificado específico para *Desulfovibrio desulfuricans*.
3. Agua de mar sintética con un agente reductor.

### 2A. MEDIO DE CULTIVO ESPECÍFICO PARA *Pseudomonas aeruginosa*.

Aspargina	3.0 g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1.0 g
MgSO <sub>4</sub> 7H <sub>2</sub> O	0.5 g
Agua Destilada	1.0 l

Se disuelven los reactivos en el agua, se ajusta el pH entre un intervalo de 6.9 y 7.2 y se esteriliza en autoclave a 15 lb/in<sup>2</sup> durante 15 minutos. Se obtiene un líquido transparente.

En este medio, una prueba empleada para identificar el crecimiento de las bacterias *Pseudomonas aeruginosa* es la aparición de un pigmento verde (pioverdina) después de 24 horas de incubación.

## 2.B MEDIO DE CULTIVO ATCC-MODIFICADO ESPECÍFICO PARA *Desulfovibrio* *desulfuricans*.

Peptona	5.0 g
Extracto de carne	3.0 g
Extracto de levadura	0.2 g
MgSO <sub>4</sub>	1.5 g
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.5 g
Sulfato ferroso amoniacal	0.1 g
Glucosa	5.0 g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	0.87 g
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.68 g
Agua	1 l

Se disuelven en el agua todos los reactivos excepto el sulfato ferroso amoniacal y la glucosa, estos últimos se disuelve aparte en un poco de agua destilada, a ambas disoluciones se les ajusta el pH a 7 y se esterilizan en autoclave a 15 lb/in<sup>2</sup> por 15 minutos.

El sulfato ferroso amoniacal se esteriliza por filtración un momento antes de adicionarse al medio.

Una vez estériles, las disoluciones se mezclan y se obtiene un líquido amarillo cristalino.

## 2C. AGUA DE MAR SINTÉTICA CON $\text{Na}_2\text{S}$ Y CLORHIDRATO DE CISTEÍNA.

NaCl	24.530 g/ml
MgCl <sub>2</sub>	5.200 g/ml
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4.090 g/ml
CaCl <sub>2</sub>	1.160 g/ml
KCl	0.695 g/ml
NaHCO <sub>3</sub>	0.201 g/ml
KBr	0.101 g/ml
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.027 g/ml
SrCl <sub>2</sub>	0.025 g/ml
NaF	0.003 g/ml

A el agua de mar sintética con la composición anterior se le adicionaron dos agentes reductores:

Na <sub>2</sub> S	3% p/p
Clorhidrato de cisteína	3% p/p

Se agrega un mililitro de cada uno de ellos por litro de agua de mar.

**APÉNDICE 3**  
**PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS**

---

### 3. TÉCNICAS PARA LAS PRUEBAS MICROBIOLÓGICAS.

#### 3A. PRUEBAS BIOQUÍMICAS PARA *Pseudomonas aeruginosa*.

A continuación se mencionan las pruebas bioquímicas utilizadas para la identificación de *Pseudomonas aeruginosa* :

- TSI : Triple Hierro Azúcar (KLIGLER).
- LIA : Lisina Hierro Agar.
- CS : Citrato de Simmons.
- MIO : Manitol Indol Ornitina.
- SIM : Sulfuro Indol Motilidad.
- CU : Caldo Úrea.

En cada tubo de ensayo con cada una de estas pruebas se sembró una asada de las bacterias *Pseudomonas aeruginosa*, dejándolos en incubación a 28°C por 24 horas.

#### 3B. NEFELOMETRÍA.

La técnica de nefelometría consiste en hacer una curva de calibración con BaCl<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, se preparan diferentes diluciones de BaCl<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 1% como se indica en la tabla 1 las cuales al leerse en el nefelómetro nos da una densidad óptica con la que se aproxima el número de bacterias según la escala de

McFarland (Tabla 1), con estos datos se elabora una curva de calibración (Fig. 1).

Las lecturas turbidimétricas se realizaron en un nefelómetro Klett-Summerson; el procedimiento para realizarlas fue muy sencillo, consistió en llenar de medio de cultivo el tubo nefelométrico de las celdas control y limpiarlo perfectamente con acetona, una vez listo se realizó la lectura de densidad óptica, el valor de esta lectura se ajustó a cero.

Después de hacer el ajuste se realizaron las lecturas para cada celda de corrosión, con las lecturas obtenidas y con la curva de calibración se realizó una interpolación en la escala de McFarland para obtener el número de bacterias por ml; las mediciones se realizaron de acuerdo con la tabla 5.1.

No. de Tubo	BaCl <sub>2</sub> al 1% ml	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> al 1% ml	No. aproximado de bacterias x 10 <sup>6</sup> /ml	Densidad Óptica
1	0.1	9.9	300	0
2	0.2	9.8	600	12
3	0.3	9.7	900	15
4	0.4	9.6	1,200	17
5	0.5	9.5	1,500	26
6	0.6	9.4	1,800	30
7	0.7	9.3	2,100	35
8	0.8	9.2	2,400	43
9	0.9	9.1	2,700	44
10	1.0	9.0	3,000	49

Tabla A. Escala de McFarland

### ESCALA DE McFARLAND CONTEO DE BACTERIAS

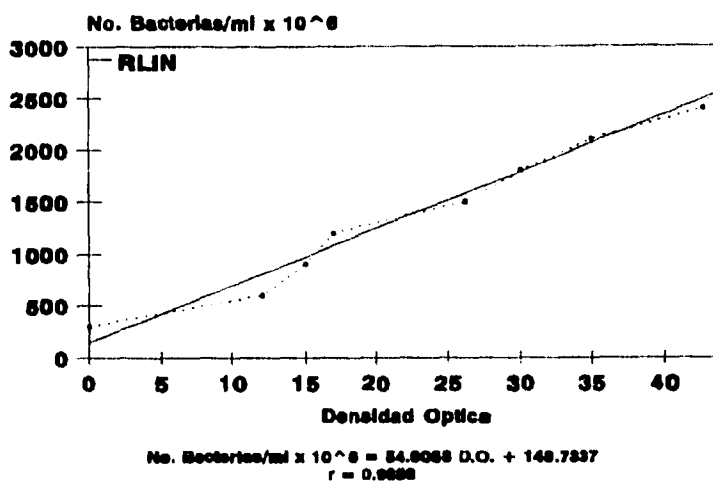


Figura A. Escala de McFarland.

### 3C. CUENTA DE BACTERIAS VIABLES PARA *Pseudomonas aeruginosa*.

Para realizar la cuenta de bacterias viables de *Pseudomonas aeruginosa* se preparó el medio de cultivo Agar-Cetrimida y la solución salina isotónica como diluyente.

**BASE AGAR-CETRIMIDA.**

Medio selectivo para identificación y aislamiento de *Pseudomonas aeruginosa*.

Peptona gelatina	20.0 g
Cloruro de magnesio	1.4 g
Sulfato de potasio	10.0 g
Agar seco	13.6 g
Cetrimida	0.3 g

Este medio se consiguió preparado mediante la fórmula anterior. El método para preparar el medio de cultivo consiste en disolver 45.3 g de la fórmula Agar-Cetrimida en un litro de agua y agregar 10 ml de glicerina. Calentar agitando frecuentemente, hervir durante un minuto. Ajustar el pH a 7.2 y esterilizar en autoclave a 15 lb/in<sup>2</sup> durante 15 minutos.

**SOLUCIÓN SALINA ISOTÓNICA.**

La solución salina isotónica consiste en preparar una disolución de cloruro de sodio al 0.9% y esterilizarla en autoclave a 15 lb/in<sup>2</sup> durante 15 minutos.

**MÉTODO PARA REALIZAR LA CUENTA DE BACTERIAS VIABLES.**

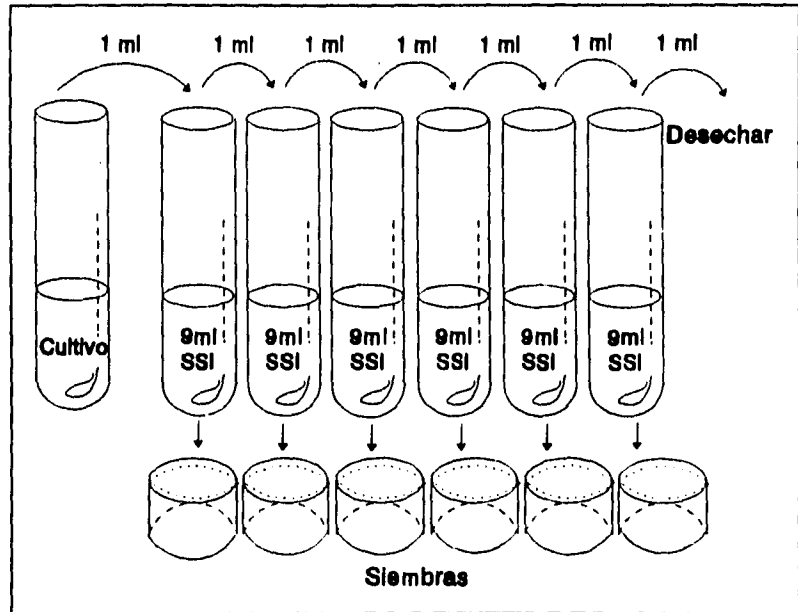
Para poder realizar un buen conteo del número de bacterias



viabiles presentes en cada una de las celdas es necesario realizar diferentes diluciones del medio original con bacteria, debido a que no se sabe si se tiene una población grande o pequeña de éstas.

Para realizar las diluciones se tomó con una jeringa estéril 1 ml de cultivo de *Pseudomonas aeruginosa* de cada celda y se transfirió a un tubo de ensayo con 9 ml de solución salina isotónica al 0.9% (SSI) estéril, esta suspensión bacteriana es una dilución 1:10 del cultivo original. Después se transfirió con la pipeta exactamente 1ml de esta dilución a un tubo de ensayo con 9 ml de SSI estéril para obtener la dilución 1:100. Se repitió el procedimiento transfiriendo 1 ml de esta nueva dilución a un tubo de ensayo con 9 ml de SSI estéril para obtener un dilución 1:1,000 se repitió la misma operación hasta obtener una dilución de 1:1,000,000 .

Se transfirió exactamente 1 ml de la dilución 1 a una caja Petri con aproximadamente 20 ml de medio Agar-Cetrimida, se agitó perfectamente, se dejó solidificar el agar y se incubó a 28°C durante 24 horas, se repitió el procedimiento para cada una de las diluciones asegurando que todos los tubos de las diluciones y las cajas petri estuvieran perfectamente etiquetados con la dilución y fecha correspondiente (Fig. B). Estas pruebas se realizaron según la tabla 5.1.



**Figura B** Diluciones para realizar la cuenta de bacterias viables.

Se calculó el número de bacterias por ml de cultivo original tomando en cuenta el factor de dilución y se graficó el logaritmo del No. de bacterias viables contra tiempo (días).

### 3D. CUENTA DE BACTERIAS VIABLES PARA

#### *Desulfovibrio desulfuricans.*

Para realizar la cuenta de bacterias viables para la mezcla de

bacterias (*Desulfovibrio desulfuricans*) se preparó el medio de cultivo específico para esta bacteria y una solución diluyente.

#### MEDIO DE CULTIVO ESPECÍFICO PARA *Desulfovibrio desulfuricans.*

KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	0.5 g
NH <sub>4</sub> Cl	1.0 g
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1.0 g
CaCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	1.0 g
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	2.0 g
Lactato de sodio	3.5 g
Extracto de levadura	1.0 g
Agar	15.0 g
H <sub>2</sub> O	1 l

Disolver todos los reactivos en el agua destilada, ajustar el pH a 7.6 y esterilizar en autoclave a 15 lb/in<sup>2</sup> durante 15 minutos. Antes de usar el medio se preparan las soluciones de cisteína al 0.075% y FeSO<sub>4</sub> al 0.05%, y se esterilizan por filtración con un filtro Suinix y asépticamente se adicionan al medio.

**SOLUCIÓN DILUYENTE.**

$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0.5 g
$\text{NH}_4\text{Cl}$	1.0 g
$\text{Na}_2\text{SO}_4$	1.0 g
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.0 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.0 g
Ácido ascórbico	0.1 g
$\text{H}_2\text{O}$	1 l

Disolver todos los reactivos en un litro de agua destilada, ajustar el pH a 7.6 y esterilizar en autoclave a 15 lb/in<sup>2</sup> durante 15 minutos.

El procedimiento para la cuenta de bacterias viables para la mezcla de bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*) es básicamente el mismo que se describió en el apéndice 3B.

Las diluciones se realizaron de manera similar que para *Pseudomonas aeruginosa*, se tomó con una jeringa estéril 1 ml de cultivo de cada una de las celdas de corrosión anaerobia y se transfirió a un tubo de ensayo con 9 ml de solución diluyente estéril, esta suspensión bacteriana es una dilución 1:10 del cultivo original. Después se transfirió con la pipeta exactamente 1 ml de esta dilución a un tubo de ensayo con 9 ml de solución diluyente estéril para obtener la dilución 1:100. Se repitió el procedimiento transfiriendo 1 ml de esta nueva

dilución a un tubo de ensayo con 9 ml de solución diluyente estéril para obtener un dilución 1:1,000 se repitió la misma operación hasta obtener una dilución de 1:1,000,000.

Se transfirió exactamente 1 ml de la dilución 1 a un tubo de ensayo con aproximadamente 5 ml de medio específico para *Desulfovibrio desulfuricans*, se agitó perfectamente, y rápidamente se transfirió a un tubo de 0.9 cm de largo por 25 cm de ancho evitando la formación de burbujas de aire en el tubo, se le colocó un tapón de parafina estéril, se dejó solidificar el agar y se incubó a 28°C durante 24 horas, se repitió el procedimiento para cada una de las diluciones asegurando que todos los tubos de las diluciones estuvieran perfectamente etiquetados con la dilución y fecha correspondiente. Esta prueba se realizó de acuerdo al calendario de la tabla 5.1.

Se calculó el número de bacterias por ml de cultivo original tomando en cuenta el factor de dilución y se graficó logaritmo del No. de bacterias viables contra tiempo (días).

### 3E. PRUEBAS DE ACTIVIDAD PARA

#### *Desulfovibrio desulfuricans.*

El primer paso fue preparar las soluciones requeridas para las pruebas de actividad, como a continuación se describe :

#### MEDIO ESPECÍFICO PARA REALIZAR LAS PRUEBAS DE ACTIVIDAD DE *Desulfovibrio desulfuricans.*

$\text{KH}_2\text{PO}_4$	1.0 g
$\text{NH}_4\text{Cl}$	1.0 g
$\text{CaSO}_4$	1.0 g
$\text{NaCl}$	20.0 g
Lactato de sodio	3.5 g
Agua Destilada	1 l

Repartir 20 mg de  $\text{CaSO}_4$  en viales de color ámbar. A continuación disolver los reactivos restantes en el agua destilada y ajustar el pH a 7.5; distribuir 20 ml de este medio en los viales que contienen el  $\text{CaSO}_4$  y esterilizar en autoclave a 15 lb/in<sup>2</sup> durante 15 minutos.

**SOLUCIÓN DE YODO (TRİYODURO) 0.1N.**

1. Pesar 4 g de yoduro de potasio (KI) en un vaso de 100 ml.
2. Añadir 1.3 g de yodo ( $I_2$ ), 10 ml de agua y agitar por espacio de 10 minutos.
3. Añadir otros 10 ml de agua y agitar.
4. Filtrar la solución con un filtro de vidrio.
5. Aforar a 100 ml y vertir el líquido a un frasco ámbar.

**SOLUCIÓN DE YODO (TRİYODURO) 0.004N.**

1. Tomar una alícuota de 20 ml de la solución de yodo 0.1N.
2. Aforar a 500 ml con agua destilada y vertir en un frasco color ámbar para su almacenamiento.

**SOLUCIÓN DE TIOSULFATO DE SODIO 0.1N.**

1. Hervir aproximadamente 150 ml de agua destilada durante 5 minutos y enfriar.
2. A 100 ml del agua hervida agregarle 2.5 g de tiosulfato de sodio pentahidratado ( $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$ ) y 0.01 g de  $Na_2CO_3$  y agitar hasta su completa disolución.
3. Transferir a un recipiente de plástico o vidrio y guardar en la oscuridad.

**SOLUCIÓN DE TIOSULFATO DE SODIO 0.004N.**

1. Tomar una alícuota de 20 ml de la solución de tiosulfato de sodio 0.1N.
2. Aforar a 500 ml con agua destilada hervida y vertir en un frasco de plástico o vidrio para su almacenamiento en la oscuridad.

**SOLUCIÓN DE ALMIDÓN (INDICADOR).**

1. Hacer una pasta mezclando 0.2 g de almidón soluble y 1 mg de  $HgI_2$  en 10 ml de agua destilada.
2. Vertir esa suspensión de 100 ml de agua hirviendo y calentar hasta que clarifique.
3. Enfriar y guardar en un frasco.

**SOLUCIÓN DE ÁCIDO SULFÚRICO 3F.**

1. Tomar 16 ml de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) concentrado (98% p/v y 1.84 g/ml).
2. Vertir 50 ml de agua destilada en un vaso de precipitados y a continuación disolver el ácido.
3. Aforar a 100 ml con agua destilada.

Ya preparadas las soluciones anteriores se procedió a la normalización de la solución de tiosulfato de sodio y la disolución de yodo.



**NORMALIZACIÓN DE TIOSULFATO DE SODIO 0.004N.**

1. Desecar yodato de potasio ( $\text{KIO}_3$ ) patrón primario durante 1 hr. a  $110^\circ\text{C}$ .
2. Dejar enfriar y guardar en desecador.
3. Pesar en balanza analítica, muestras de aproximadamente 0.0015 g de  $\text{KIO}_3$  en matraces Erlenmeyer de 150ml.
4. Disolver en aproximadamente 10 ml de agua destilada.
5. Después de pesados los matraces se manejan individualmente.
6. Añadir 0.5 g de yoduro de potasio (KI) y agitar el matraz.
7. Agregar 1 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  3F y valorar el yodo liberado con la solución de tiosulfato de potasio hasta que el color de la solución sea amarillo pálido.
8. Introducir 1 ml de indicador de almidón y continuar valorando hasta que desaparezca el color azul.
9. Leer el volumen de tiosulfato de sodio y calcular la normalidad con la siguiente expresión :

$$N \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 28.0374 \frac{\text{g de KIO}_3}{\text{ml gastados de Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$$

**NORMALIZACIÓN DE LA SOLUCIÓN DE YODO 0.004N.**

1. Transferir una alícuota de 10 ml de la solución de yodo 0.004N a un matraz erlenmeyer de 150ml.

2. Añadir 1 ml de  $H_2SO_4$  3F y valorar inmediatamente con tiosulfato de sodio hasta que la disolución quede color amarillo pálido.
3. Introducir 1 ml de indicador de almidón y continuar valorando hasta que desaparezca el color azul.
4. Leer el volumen de tiosulfato de sodio y calcular la normalidad de la solución de yodo como sigue :

$$N I_2 = N Na_2S_2O_3 \frac{\text{ml gastados de } Na_2S_2O_3}{\text{ml de la alícuota de } I_2}$$

Con lo anterior se procedió a realizar el siguiente procedimiento para cuantificar la actividad de la mezcla de bacterias sulfato reductoras.

La técnica consistió en extraer cada 5 días, durante 20 días, 5 ml de medio del vial inoculado con muestras de las celdas en estudio.

Los pasos a seguir en la cuantificación de la actividad son los siguientes :

1. Tomar una alícuota de 10 ml de solución de yodo 0.004N y verterla en una matraz erlenmeyer de 150 ml.
2. Agregar 1 ml de ácido sulfúrico 3F.
3. Extraer 5 ml de muestra del vial con ayuda de una jeringa estéril y burbujear dentro de la alícuota de solución de yodo.

4. Agitar perfectamente y agregar 0.2 g de carbonato de sodio.
5. Enseguida titular con solución de tiosulfato de sodio 0.004N.
6. Calcular la concentración molar de ácido sulfhídrico producido mediante la siguiente expresión (hay que hacer uso de las concentraciones normales calculadas con las expresiones anteriores) :

$$M \text{ H}_2\text{S} = N \text{ I}_2 - \frac{N \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 * \text{ ml gastados de Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}{10}$$

7. Calcular la molaridad de  $\text{CaSO}_4$  que se tiene en el vial con la siguiente expresión :

$$\text{Molaridad final CaSO}_4 = M \text{ inicial de CaSO}_4 - M \text{ H}_2\text{S}$$

**APÉNDICE 4**  
**MICROSCOPIA ELECTRÓNICA**

---

## 4A. PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

Para realizar las pruebas de microscopía electrónica fue necesario pulir a espejo cada una de las piezas de acero con la finalidad de obtener una superficie completamente lisa y uniforme, para conseguir un pulido a espejo en la superficie de las piezas se utilizaron varios materiales dando el terminado final con una lija de número 4000 y alúmina.

Con las piezas pulidas a espejo se realizó lo que a continuación se describe :

Para el caso de corrosión en medio aerobio se usaron dos cajas Petri estériles. En condiciones asépticas, se colocaron aproximadamente 15ml de medio de cultivo estéril específico para *Pseudomonas aeruginosa* en cada una de las cajas, a una se adicionó 1 ml de cultivo de *Pseudomonas aeruginosa* y a ambas se les colocó una pieza de acero pulida a espejo perfectamente limpia (la limpieza se realizó con alcohol y medio de cultivo estéril para retirar los residuos de alcohol) y se taparon; ambas cajas se dejaron en condiciones ambientales durante 36 días.

Para el caso de corrosión anaerobia se usaron 2 viales de color ámbar. Trabajando en condiciones asépticas se colocó en uno de los viales una pieza de acero pulida a espejo y perfectamente limpia a continuación se agregaron 7ml de medio de cultivo estéril específico para *Desulfovibrio desulfuricans*,

se engargoló e inmediatamente después se le burbujeó nitrógeno por espacio de 3 minutos para conseguir un ambiente anaerobio, en el otro vial se hizo lo mismo, sólo que se le agregó 1 ml de la mezcla de bacterias sulfato reductoras (*Desulfovibrio desulfuricans*). Ambos viales se dejaron en condiciones ambientales durante 36 días.

#### **4B. LIMPIEZA DE LAS MUESTRAS.**

Para realizar esta tarea, el primer paso consistió en esterilizar las piezas introduciéndolas en fenol al 5% por espacio de 30 min; al término de este tiempo se procedió a lavar las piezas con agua destilada y remover la biopelícula con la ayuda de una pieza de hule suave; ya libres de los productos de corrosión y productos orgánicos, por último, se limpiaron con acetona.

**APÉNDICE 5**  
**EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN POR PICADO**

---

**APÉNDICE 5**  
**EVALUACIÓN DE LA CORROSIÓN POR PICADO**

---



## **5. PRÁCTICA STANDARD PARA EXAMINACIÓN Y EVALUACIÓN DE CORROSIÓN POR PICADO.**

### **1. ALCANCE**

1.1 Esta práctica es una guía para ayudar en la selección de procedimientos que pueden ser usados en la identificación y examinación de corrosión por picadura para así poder determinar la extensión de su efecto.

1.2 Este standard puede involucrar materiales, operaciones y equipo peligrosos. Este standard no pretende dirigir todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Esto es responsabilidad de la persona que use este standard para consultar y establecer las prácticas apropiadas de sanidad y seguridad y determinar la aplicabilidad de las limitaciones antes de su uso.

### **2. DOCUMENTOS DE REFERENCIA.**

#### **2.1 ASTM STANDARDS :**

E3 Methods of Preparation of Metallographic Specimens.

G1 Practice for Preparing, Cleaning and Evaluating Corrosion Test Specimens.

G16 Practice for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data.

#### **2.2 National Association of Corrosion Engineers Standard:**

RP-01-73 Collection and Identification of Corrosion Products.

### **3. DEFINICIÓN**

**3.1 PICADURA :** Es la corrosión localizada en una superficie metálica, que confiere un punto o área pequeña, que toma la forma de cavidad.

### **4. SIGNIFICANCIA Y USO**

**4.1** Para determinar la extensión de la picadura es importante saber si la aplicación es en un servicio donde es necesario predecir la duración restante de una estructura metálica o en un programa de pruebas de laboratorio que se usa para seleccionar el mejor material resistente a la corrosión por picadura para un servicio dado.

### **5. IDENTIFICACIÓN Y EXAMINACIÓN DE CAVIDADES O PICADURAS.**

**5.1 INSPECCIÓN VISUAL.** Un examen visual de la superficie metálica corroida es usualmente benéfica, y esto se hace bajo luz ordinaria, con o sin la ayuda de una lupa de bajo poder, para determinar la extensión de la corrosión y la aparente localización de las picaduras. Es aconsejable tomar una fotografía de la superficie corroida y así poder comparar con la superficie limpia después de remover los productos de corrosión.

**5.1.1** Si el espécimen metálico ha sido expuesto a un ambiente desconocido, la composición de los productos de corrosión puede ser de gran importancia para determinar la causa de la corrosión.

**5.1.2** Para exponer completamente la picadura se usan procedimientos de limpieza recomendados para remover los productos de corrosión y así evitar soluciones que ataquen excesivamente la base del metal. Puede ser aconsejable durante la limpieza, explorar las picaduras con una herramienta

puntiaguda para determinar la extensión de la corrosión subsuperficial. Sin embargo el realizar la limpieza con un cepillo de cerdas duras algunas veces ampliará las picaduras abriendo suficientemente como para remover todos los productos de corrosión, o rebajará el metal para hacer que las picaduras sean más fácil de evaluar.

5.1.3 Examinar la superficie metálica limpia bajo luz ordinaria para determinar el tamaño aproximado y la distribución de las picaduras o cavidades. Seguir este procedimiento para un examen más detallado a través de un microscopio usando un aumento bajo.

5.1.4 Determinar el tamaño, forma y densidad de la cavidad.

5.1.4.1 Las cavidades pueden tener varios tamaños y formas. Un examen visual de la superficie metálica puede mostrar un círculo alargado o una abertura irregular, pero rara vez da una identificación correcta de la corrosión debajo de la superficie. Así que es necesaria una sección transversal de la picadura para ver su forma y determinar su profundidad verdadera.

5.1.4.2 Es un trabajo tedioso determinar la densidad de la picadura por medio del conteo de las cavidades con un microscopio ocular, pero la tarea puede facilitarse con el uso de una malla de plástico. Cada espacio de la malla contiene de 3 a 6 mm<sup>2</sup>, en la superficie metálica. Contar y registrar el número de cavidades en cada cuadro y mover la malla de forma sistemática hasta que se haya cubierto toda la superficie. Este procedimiento minimiza la vista cansada porque los ojos pueden tomar la forma del campo de visión con miedo y perder el área de interés.

5.1.5 Examen Metalográfico. Seleccionar y cortar una porción significativa de la superficie metálica que contenga las picaduras y preparar el espécimen para el examen

metalográfico de acuerdo con los procedimientos recomendados en E3. Examinar metalográficamente para determinar si hay una relación entre las picaduras y la microestructura, o si las cavidades son hoyos verdaderamente o si pudieron haber resultado de una corrosión intergranular.

**5.2 INSPECCIÓN NO DESTRUCTIVA.** Se han desarrollado numerosas técnicas para ayudar en la detección de grietas o cavidades en la superficie metálica sin la destrucción de éste. Estos métodos son menos efectivos para localizar y definir la forma de las picaduras que los que se mencionaron anteriormente, pero ellos merecen consideración porque algunas veces son usados *in situ*, y así son más usados en el campo de aplicación.

**5.2.1 Radiografía.** La radiación, tal como los rayos X se pasan a través del objeto. La intensidad de los rayos varían de acuerdo con el espesor del material. Las imperfecciones pueden detectarse si causan un cambio en la absorción de los rayos X. Detectores o películas se usan para dar una imagen de las imperfecciones interiores. El espesor de un metal que puede ser inspeccionado depende de la potencia de salida de la energía. Los poros o picaduras deben ser tan grandes como la 1/2% del espesor del metal para que puedan ser detectadas. Esta técnica tiene únicamente una ligera aplicación para la detección de las picaduras, pero puede ser útil para comparar especímenes antes y después de la corrosión para determinar si las picaduras han ocurrido y si están asociadas con la porosidad previa. Esto pueda ser útil para determinar la extensión de la subsuperficie de las picaduras.

**5.2.2 Electromagnético :**

**5.2.2.1** Las corrientes remolino pueden usarse para detectar defectos o irregularidades en la estructura de los materiales electricamente conductores. Cuando un espécimen es

expuesto a una variación de un campo magnético, produce mediante una conexión a un carrete una corriente alterna, las corrientes remolino se inducen al espécimen y ellas producen un campo magnético del suyo propio. Los materiales con defectos producirán un campo magnético que es diferente de aquel que pertenezca a un material de referencia sin defectos y para detectar estas diferencias se requiere de un apropiado instrumento de detección.

5.2.2.2 La inducción de un campo magnético en materiales ferromagnéticos es otra aproximación que puede ser usada. Las discontinuidades que son transversales a la dirección del campo magnético causan un campo fuga sobre la superficie de la parte.

Las partículas ferromagnéticas tiene lugar en la superficie para detectar el campo fuga y para delinear la forme y tamaño de las discontinuidades. Mejor las imperfecciones pequeñas pueden ser detectadas por este método. Sin embargo, el método se limita por la direccionalidad requerida de los defectos del campo magnético, por la posible necesidad de desmagnetización del material y por la forma limitada de las partes que pueden ser examinadas.

#### 5.2.3 Sónicos :

5.2.3.1 En el uso de ultrasónicos, pulsos de energía se transmiten a través de una planta, sobre la superficie del metal donde las ondas son generadas. Las repercusiones reflejadas pueden convertirse a señales eléctricas que pueden ser interpretadas como la localización de los defectos o picaduras. La prueba ha sido de buena sensibilidad y da información instantánea a cerca del tamaño y localización de las fallas. Sin embargo, se requieren las referencias standard para comparar e interpretar los resultados formales.

5.2.3.2 Una aproximación alternativa es usar emisiones acústicas en la detección de las picaduras del metal. Las imperfecciones, tales como cavidades generan emisiones de alta

frecuencia bajo stress mecánico o térmico. La frecuencia de emisión y el número de veces por unidad de tiempo determina la presencia de los defectos.

5.2.4 Penetrantes. Los defectos que abren la superficie pueden ser detectados por la aplicación de un líquido penetrante que subsecuentemente "exudes" de la superficie, después que el exceso penetrado ha sido removido. Los defectos se localizan rociando la superficie del metal con un revelador que reacciona con una tinta en el líquido penetrante, o el penetrante puede contener un material fluorescente que puede ser visto con luz negra. El tamaño de los defectos se muestran con la intensidad del color. Esta técnica da únicamente una aproximación de la profundidad y tamaño de las cavidades.

5.2.5 Ninguno de estos métodos no destructivos da una información detallada satisfactoria acerca de las picaduras. Ellos pueden ser usados para localizar las cavidades y dar alguna información acerca del tamaño de las cavidades, pero generalmente no son capaces de detectar pequeñas picaduras.

## **6. EXTENSIÓN DE LA PICADURA.**

6.1 PÉRDIDA DE PESO. La pérdida de peso de un metal no es muy recomendada para usarse como una medida de la extensión de la picadura a menos que la corrosión general sea ligera y la corrosión por picadura sea fuertemente severa. Si la corrosión uniforme es significativa, la contribución del picado a la pérdida de peso total es pequeña; y el peligro que esta representa no puede ser determinado exactamente de la pérdida de peso. En algunos casos la pérdida de peso únicamente da información acerca de la pérdida de peso total debido a la picadura pero no da información acerca de la profundidad de penetración ésta. Sin embargo, la prueba de pérdida de peso no debería ser descuidada en algunos casos porque puede ser de

gran valor, por ejemplo, la pérdida de peso sola con una comparación visual de las superficies picadas puede ser adecuada para evaluar la resistencia a la corrosión por picadura, de algunas aleaciones, en las pruebas de laboratorio.

## **6.2 MEDICIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE PICADO :**

6.2.1 Metalográfico. La profundidad de picado puede ser determinada por medio de una sección vertical, a través de la preselección de la cavidad, montando metalográficamente la sección transversal de la cavidad y puliendo la superficie. La profundidad de la cavidad es medida en lo liso, superficie pulida, con la ayuda de un microscopio con un ocular calibrado. El método es muy exacto, pero requiere de un buen juez en la selección de la picadura y una buena técnica en el corte a través de la cavidad. Sus limitaciones son que consume mucho tiempo y la cavidad más profunda pudo no seleccionarse y la cavidad pudo no haber sido seccionada en el punto más profundo de penetración.

### **6.2.2 Maquinando :**

6.2.2.1 Este método requiere de una muestra que sea de forma regular e involucra la destrucción del espécimen. Medir el espesor de la muestra entre dos áreas que no han sido afectadas por la corrosión general. Seleccionar una porción de la superficie en un lado del espécimen que no este relativamente afectado; entonces poner en un término de precisión la superficie opuesta donde las picaduras están localizadas, moler o pulverizar hasta que todos los signos de corrosión hayan desaparecido. Medir el espesor de la muestra entre la superficie no afectada y restar del espesor original para dar la profundidad máxima de picado. Repetir este procedimiento en la superficie no usada a menos que el espesor haya sido reducido al 50% o más durante el procedimiento del primer lado.

6.2.2.2 Este método es igualmente usado para determinar el número de cavidades con profundidad específica.

6.2.3 Micrómetro o Medidor de la Profundidad :

6.2.3.1 Este método se basa en el uso de aguja unida a un micrómetro o medidor de la profundidad para penetrar la cavidad de la picadura. Se pone en cero el instrumento en una área que no este afectada en el borde de la picadura. Insertar la aguja en la picadura hasta alcanzar la base donde se hace una nueva lectura. La distancia que viaja la aguja es la profundidad de la picadura. Es mejor usar instrumentos con tensión constante para minimizar la penetración del metal en la base de la picadura. Puede tener ventajas usar un estereomicroscopio junto con esta técnica, así la picadura puede aumentarse para asegurar que la aguja llegue al fondo de la cavidad. Este método se limita a las picaduras que tienen una abertura suficientemente grande para acomodar la aguja sin ninguna obstrucción.

6.2.3.2 Una variación de este método, es juntar la sonda a un esferómetro y conectarlo a través de un microamperímetro y una batería al espécimen. Cuando la prueba toca el fondo de

la picadura, se cierra el circuito eléctrico y el movimiento de la sonda es una medida de la profundidad. Este método se limita a formas muy irregulares porque el contacto con un lado de la picadura podría dar una lectura errónea.

6.2.4 Microscopía. Este método es particularmente de gran valor cuando las picaduras son muy estrechas o difícil de penetrar con una sonda de algún tipo de instrumento.

El método está a favor de usar la luz tan grande como para poder enfocar la base de la picadura.

6.2.4.1 Usar un microscopio metalúrgico con un aumento de



50 a 500X.

6.2.4.2 Localizar una picadura aislada en la superficie del metal y centrarla bajo el lente objetivo del microscopio en un aumento bajo, por ejemplo 50X. Incrementar el aumento del lente hasta que el área de la picadura cubra la mayor parte del campo de visión. Enfocado el espécimen en el borde de la picadura, usar primero un enfoque ordinario y después un enfoque fino. Registrar la lectura inicial del enfoque fino, reenfocar el fondo de la picadura con el foco fino y registrar la lectura. La diferencia entre las lecturas inicial y final con el foco fino es la profundidad de la picadura.

6.2.4.3 Repetir los pasos de 6.2.4.2 para obtener lecturas adicionales o hasta que un duplicado satisfactorio se haya obtenido. Por ejemplo se puede obtener la profundidad de la cavidad en una picadura aislada a cuatro aumentos diferentes y de cada una obtener un promedio.

## **7. EVALUACIÓN DE LA PICADURA.**

7.1 Hay algunas formas en las que las picaduras pueden describirse dando una expresión cuantitativa para indicar su significancia o para predecir la vida de un material. Algunos de los métodos más comunes se describen en esta sección, aunque frecuentemente se encuentra que un método no es suficiente por sí solo.

### **7.2 CARTAS STANDARD :**

7.2.1 La rapidez de picado en términos de densidad, tamaño y profundidad de la cavidad se basa en cartas standard, en las cuales se encuentran dos columnas que relacionan la extensión del picado en la superficie del metal, densidad y tamaño, y una tercera columna que da el promedio de la profundidad de la cavidad.

7.2.2 Este método ofrece un medio efectivo de comunicación entre quienes están familiarizados con estas cartas, y es una forma simple de obtener información para poder comparar con los resultados de otro tipo de prueba. Sin embargo es tedioso y consume tiempo medir todas las picaduras, el tiempo que se usa generalmente no se justifica porque los valores máximos (por ejemplo profundidad de picadura) tienen mayor interés que los valores promedio.

### 7.3 PENETRACIÓN DEL METAL :

7.3.1 Medir la cavidad más profunda y representar la penetración del metal en términos del valor mayor de la profundidad de la cavidad y del promedio. Este tipo de lecturas es particularmente significativo cuando el metal se asocia con gas o líquido encerrado y un hoyo podría dejar una pérdida de fluido.

7.3.2 La penetración del metal puede también expresarse en términos de un factor de picado. Este es la relación de la penetración del metal más profunda y el promedio de penetración del metal, determinado por medio de pérdida de peso, como se muestra en la siguiente relación :

$$\text{Factor de picado} = \frac{\text{Penetración más profunda}}{\text{Promedio de penetración}}$$

Un factor de picado de uno representa corrosión uniforme; el número más grande de la profundidad de penetración mayor. El factor no es aplicable en los casos donde la corrosión de picado o general es muy pequeña porque los valores de cero o infinito pueden fácilmente obtenerse cuando se trata con una proporción.

#### 7.4 ESTADÍSTICA :

7.4.1 La aplicación estadística de los análisis de los datos de corrosión se encuentra en la práctica G16.

7.4.2 La probabilidad que el picado inicie en la superficie de un metal depende de varios factores, tales como, la tendencia de picado del metal, la corrosividad de la solución, el área y el tiempo de exposición. Un prueba de probabilidad de picado puede hacerse para determinar la susceptibilidad de los metales a la picadura, pero no dará información a cerca de la velocidad de propagación y los resultados son únicamente aplicables a las condiciones de exposición. La probabilidad de picado (P) en % después de la exposición de un número de especímenes para unas condiciones particulares pueden expresarse como sigue :

$$P = \frac{N_p}{N}$$

Donde :

$N_p$  = número de especímenes picados.

N = número total de muestras.

7.4.2 La relación entre la profundidad de la cavidad y el área o tiempo de exposición puede variar con el ambiente, la exposición del metal y otras variables. Las relaciones que se citan en 7.4.2.1 y 7.4.2.2 son ejemplos que han sido encontrados cuando se aplica bajo ciertas condiciones de exposición.

7.4.2.1 Las siguientes relaciones se encontraron entre la profundidad mayor de picado (D) y el área (A) de una tubería expuesta al suelo :

$$D = bA^a$$

Donde:  $a$  y  $b > 0$ ,  $a$  y  $b$  son constantes que se derivan de la pendiente y la ordenada al origen de una línea recta que se obtiene de los logaritmos del promedio de la profundidad de picado para áreas que se incrementan sucesivamente en la tubería; y los logaritmos de las áreas correspondientes. La dependencia en el área se le atribuye a la posibilidad del incremento de la profundidad de picado que se encuentra cuando el tamaño de la muestra de la picadura se incrementa a través de un incremento del área de la superficie corroída.

7.4.2.2 Los valores estadísticos extremos de probabilidad han sido aplicados con éxito para datos de profundidad máxima de picado para estimar el valor máximo de picado de una área muy grande de material en base a la examinación de una pequeña porción de área. El procedimiento es medir las profundidades máximas de picado en algunas replicas de los especímenes que han sido corroídos, después ordenar los valores de la profundidad de picado de forma creciente. Una posición gráfica de cada orden se obtiene sustituyendo en la relación,  $M/(n+1)$ , donde  $M$  = orden y  $n$  = número total de muestras o valores. Por ejemplo, la posición gráfica de del segundo valor de 10 valores deberá ser  $2/(10+1)=0.1818$ . Estos valores se gráfica en la ordenada del documento de probabilidad del valor extremo contra su respectiva profundidad de picado máxima. Si se obtiene una línea recta indica que el valor estadístico extremo puede ser aplicado. La extrapolación de la línea recta puede usarse para determinar la probabilidad de que una profundidad específica ocurriera o el número de observaciones que deberán hacerse para encontrar una profundidad de picado particular.

7.5 **PÉRDIDA DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.** Si el picado es la forma predominante de corrosión y la densidad de la picadura es relativamente alta, el cambio en una propiedad mecánica puede ser usada con ventaja para evaluar la picadura.

Las propiedades típicas que son consideradas para este propósito son resistencia, elongación, fatiga, resistencia al impacto, etc.

7.5.1 Los especímenes representativos del metal se exponen a las mismas condiciones excepto al del medio corrosivo. Las propiedades mecánicas de los especímenes expuestos y de los no expuestos se miden después de la prueba, la diferencia entre los dos resultados se le atribuye a la corrosión.

7.5.2 Algunos de estos métodos son más adecuados para la evaluación de otras formas de corrosión localizada, tal como corrosión intergranular, de esta forma las limitaciones deben ser consideradas. En algunos casos los cambios en las propiedades mecánicas debido a la corrosión por picadura puede ser muy pequeña para dar resultados significativos. Probablemente uno de los problemas más difíciles es separar los efectos otro tipo de corrosión a los debidos por picadura.

## **8. REPORTE**

8.1 El reporte debe incluir la información más detallada posible, tal como :

8.1.1 Tratamiento metalúrgico del metal, preparación de la superficie y terminado de la superficie antes de la prueba.

8.1.2 Condiciones ambientales y tiempo de exposición al medio corrosivo.

8.1.3 Apariencia de la superficie corroida antes y después de la prueba.

8.1.4 Identificación de los productos de corrosión.

8.1.5 Caracterización de la picadura, incluyendo : tamaño, forma, densidad, uniformidad de distribución, profundidad de la picadura (promedio y máxima).

8.1.6 Cambio en propiedades mecánicas como resultado de la corrosión y el método por el cual se determino.

**APÉNDICE 6**  
**EJEMPLOS NUMÉRICOS PARA CALCULAR**  
**LA RAPIDEZ DE CORROSIÓN**

---

## 6.A RAPIDEZ DE CORROSIÓN A PARTIR DE LA TÉCNICA DE PENDIENTES DE TAFEL.

Para ilustrar el procedimiento del cálculo del valor de la Rapidez de Corrosión a partir de la técnica de pendientes de Tafel, se toma como ejemplo el barrido del día cero del electrodo periódico de la Celda 3 del experimento C (Sulfato reductoras en Agua de Mar).

1. Se calculan los valores de polarización y densidad de corriente a partir de los datos del barrido de Potencial-Corriente aplicado al electrodo sometido a PT.

$$\eta = E_{\text{aplicado}} - E_{\text{circuito abierto}} [=] \text{ mV}$$

$$J = \text{Intensidad de corriente} / \text{área del electrodo} = I/A \\ = \text{Intensidad de corriente} / 0.468^2 [=] \text{ mA/cm}^2$$

2. A continuación se obtiene una gráfica del logaritmo de la densidad de corriente contra la polarización aplicada (figura A); a partir de ella se determina la sección lineal de las curvas anódicas y catódicas, esto es, se eligen los puntos cuya tendencia sea lo más cercano a una recta. Habiendo realizado lo anterior, se obtiene la ecuación de las rectas y sus coeficientes de correlación lineal (el cálculo resulta sencillo si se utiliza una hoja de cálculo como pueden ser Lotus o Excel). En este caso se obtiene la siguientes ecuaciones :

Recta Anódica.

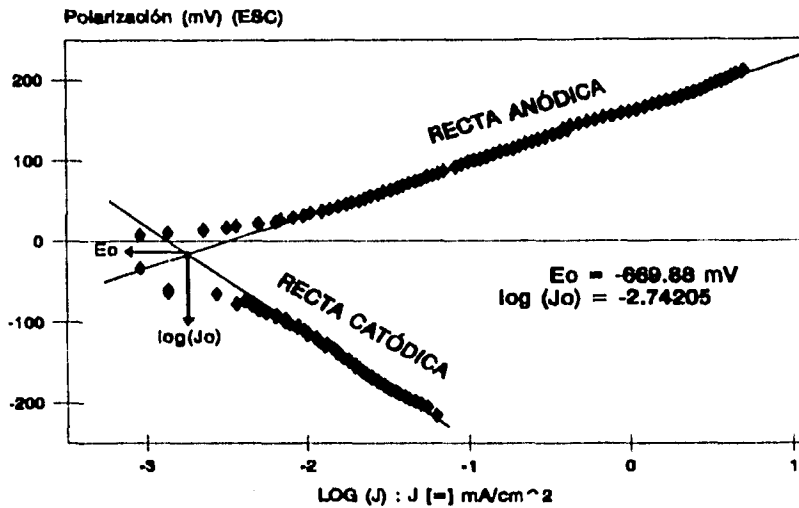
$$\eta = 64.58946 \log(J) + 161.2311 \quad \text{Ec.1}$$

$$r = 0.99908$$

Recta Catódica.

$$\eta = -132.449 \log(J) - 379.058 \quad \text{Ec.2}$$

$$r = 0.99732$$



**Fig. A Pendientes de Tafel.**  
 Desulfovibrio d. en agua de mar,  
 celda 3, día cero.

3. Como se tienen dos ecuaciones (ecuaciones 1 y 2) y dos incógnitas ( $\eta$  y  $\log J$ ), se pueden reescribir en forma de un sistema de ecuaciones simultáneas para determinar el punto de intersección, y así, conocer la densidad de corriente de corrosión ( $J_o$ ).



$$\eta - 64.58946 \log(J) = 161.2311 \quad \text{Ec.3}$$

$$\eta + 132.449 \log(J) = -379.058 \quad \text{Ec.4}$$

Al resolver el sistema de ecuaciones anterior se obtiene la siguientes solución :

$$\eta_0 = -15.88 \text{ mV}$$

$$\log(J_0) = -2.74205$$

exponenciando para conocer el valor de  $J_0$  se obtiene :

$$J_0 = 1.811 \times 10^{-3} \text{ mA/cm}^2$$

4. Por último la Rapidez de Corrosión para el acero AISI 1010 se calcula con la ecuación 5 (es la misma que se reportó en el capítulo 6) :

$$\text{R.C. (mm/año)} = 11575.2275 ( J_0 \text{ [=} \text{] A/cm}^2 ) \quad \text{Ec. 5}$$

Como en la ecuación anterior se necesita que  $J_0$  este en  $\text{A/cm}^2$ , se realiza la conversión de miliAmpers a Ampers del valor de  $J_0$  calculado en el paso 3.

$$\begin{aligned} J_0 &= 1.811 \times 10^{-3} \text{ mA/cm}^2 * 1 \text{ A/1000 mA} \\ &= 1.811 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \end{aligned}$$

sustituyendo en la ecuación 5 :

$$\text{R.C. (mm/año)} = 11575.2275 ( 1.811 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 )$$

El valor de rapidez de corrosión en milímetros por año que se obtiene, es el siguiente :

$$\text{R.C. (mm/año)} = 0.02097 \text{ mm/año}$$

## 6.B RAPIDEZ DE CORROSIÓN A PARTIR DE LA TÉCNICA DE RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.

Para mostrar el procedimiento que se siguió en el cálculo del valor de la Rapidez de Corrosión a partir de esta técnica, se toma como ejemplo el barrido del día cero del electrodo periódico sometido a RP de la Celda 3 del experimento C (Sulfato reductoras en Agua de Mar).

1. Se calculan los valores de polarización y densidad de corriente a partir de los datos del barrido de Potencial-Corriente aplicado al electrodo sometido a RP.

$$\eta = E_{\text{aplicado}} - E_{\text{circuito abierto}} [=] \text{ mV}$$

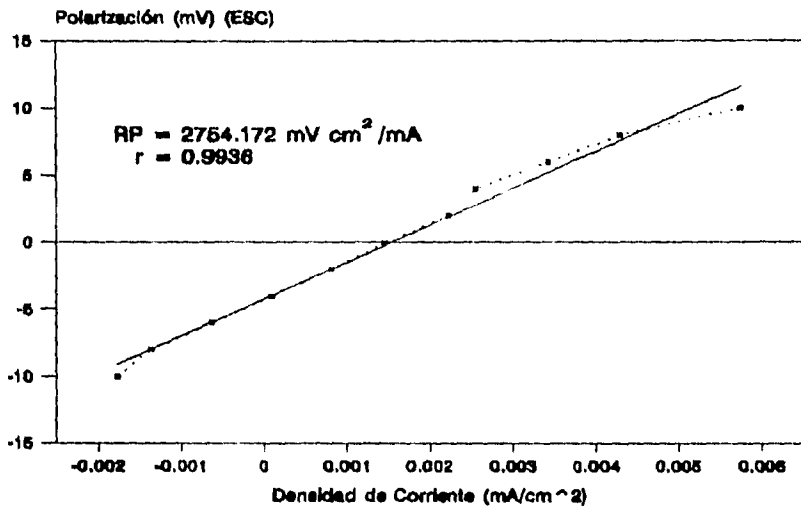
$$J = \text{Intensidad de corriente} / \text{área del electrodo} = I/A$$

$$= \text{Intensidad de corriente} / 0.468^2 [=] \text{ mA/cm}^2$$

2. En este caso se puede obtener una gráfica de densidad de corriente contra la polarización aplicada (figura B), o bien, únicamente se calcula la ecuación de la recta por medio de una regresión lineal. En este caso se obtiene la siguiente ecuación de la recta y su correspondiente coeficiente de correlación :

$$\eta = 2754.1720 (J) - 4.21872 \quad \text{Ec. 6}$$

$$r = 0.9936$$



**Fig. B Resistencia a la Polarización.**  
Desulfobrio d. en agua de mar,  
celda 3, día cero.

3. Como se mencionó en el capítulo 1, al valor de la pendiente de la recta de  $\eta$  contra  $J$  se le conoce como  $RP$ , y a su vez éste se relaciona con la densidad de corriente de corrosión ( $J_0$ ), mediante la ecuación :

$$J_0 = \frac{ac}{2.303(RP)(a+c)} \quad \text{Ec. 7}$$

Donde,  $a$  y  $c$  son las pendientes de Tafel anódica y catódica respectivamente.

Para calcular la densidad de corriente de corrosión se utiliza el valor absoluto de las pendientes de Tafel. En este ejemplo se utilizan las pendientes calculadas en la sección anterior y se sustituye el valor de RP calculado en el punto 2 en la ecuación 7 :

$$RP = 2754.172 \text{ mV cm}^2/\text{mA}$$

$$a = 64.5846 \text{ mV}$$

$$c = 132.449 \text{ mV}$$

$$J_o = \frac{(64.5846)(132.449)}{2.303(2754.172)(64.5846 + 132.449)}$$

$$J_o = 6.84 \times 10^{-3} \text{ mA/cm}^2$$

4. Por último la Rapidez de Corrosión para el acero AISI 1010 se calcula con la ecuación 5 :

$$R.C. \text{ (mm/año)} = 11575.2275 ( J_o [=] \text{ A/cm}^2 )$$

Realizando la conversión de miliAmperes a Amperes y sustituyendo en la ecuación 5 :

$$\begin{aligned} J_o &= 6.84 \times 10^{-3} \text{ mA/cm}^2 * 1 \text{ A}/1000 \text{ mA} \\ &= 6.84 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \end{aligned}$$

$$R.C. \text{ (mm/año)} = 11575.2275 ( 6.84 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 )$$

El valor de rapidez de corrosión en milímetros por año que se obtiene, es el siguiente :

$$\text{R.C. (mm/año)} = 0.07923 \text{ mm/año}$$

## **BIBLIOGRAFÍA**

---

1. American Type Culture Collection Catalogue of Bacteria and Bacteriophages (ATCC). 17th ed., Rockville-Maryland U.S.A., 1989.
2. Apraiz, B. J. Fabricación de hierro, aceros y fundiciones. Ed. Urmo S.A., Tomos I y II, España, 1984.
3. Baumeister T., Avallone E., Baumeister T. Manual del Ingeniero Mecánico. Ed. Mc Graw Hill, Tomo III, México, 1982.
4. Beishur L. Microbiology in Practice. Ed. Canfield Press, San Fco. U.S.A., 1977.
5. Bergey's. Manual of Systematic Bacteriology. Ed. William and Wilkins, U.S.A., 1997.
6. Boas A. E. La Industria Siderúrgica en América Latina. Panamá, 1966, p. 9-33, 106-115.
7. Buecker Brad. Beware of Condenser Fouling. Chemical Engineering. vol. 102, No. 4, New York U.S.A., april 1995, p. 108-112.
8. Castellan Gilbert W. Fisicoquímica. 2ª ed., Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, México, 1987.
9. Champion, F.A. Ensayos de Corrosión. Ed. URMO S.A de Ediciones, México, 1976.
10. Chantereau, J. Corrosión Bacteriana. Ed. Limusa, México, 1985.

11. Costerton, William J. The Microbiology Ecology of Surface Colonization and of Consequent Corrosion. Nace 8, U.S.A., 1985, p. 223-232.
12. Dexter, Stephen C. General Biological Corrosion. ASM Handbook, Vol. 13 Corrosion, U.S.A., 1992, p. 87-88.
13. Dexter, Stephen C. Localized Biological Corrosion. ASM Handbook, Vol. 13 Corrosion, U.S.A., 1992, p. 114-122.
14. Dexter S. C. et al. Use and Limitations of Electrochemical Techniques for Investigating Microbiological Corrosion. Corrosion, april 1991, p. 308-318.
15. Fontana, M. Corrosion Engineering. Ed. McGraw Hill Book Co., U.S.A., 1986.
16. Galvele José R. Corrosión. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Washintong D.C. E.U.A., 1979.
17. Hamilton, W.A. Biological and Corrosion Activities of Sulphate-Reducing Bacteria within Natural Biofilms. NACE 8, U.S.A., 1985, p. 47-68.
18. James D. E., Kylander J. E. Culturing Bacteria and Fungi. Ed. Carolina Biological Supply. U.S.A., 1982.
19. Jawetz E., Melnick L. J., Adelberg E. A, Brooks G., Microbiología Médica. Ed. El Manual Moderno, México, D.F., 1990. Koby T. G., Ronald D. H. Fundamental



20. Experiments in Microbiology. Ed. Saunders Company, London England, 1974.
21. Little, B. An Overview of Microbiology Influenced Corrosion. *Electrochemical Acta*, Vol. 37, No. 2, U.S.A., 1992, p. 2185-2193.
22. Mackintosh, Watson y O' Grady. Development and further applications of a simple turbidity cell of continuously monitoring bacterial growth. *Phys. Med. Biol.*, Vol 18, No. 2, 1973, p. 265-271.
23. Manual of Clinical Microbiology. 5th ed., Ed. American Society for Microbiology, Washintong D.C. U.S.A., 1985, p. 431-432.
24. Multiple-Tube Technique for *Pseudomonas aeruginosa*. Standard Methods for Water and Wastewater, 18th ed., American Public Health Association, Washintong D.C. U.S.A., 1992, p. 9-31 & 9-32.
25. Nomura Kiyoshi. Response of Oxide Films on Stainless Steel as pH Sensor. *Anal. Chem.*, Vol. 60, U.S.A., 1988, p. 2564-2567.
26. Ondrey Gerald et al. Blast Furnaces Make Way for New Steel Technology. *Chemical Engineering*. Vol. 102, No.3, New York U.S.A., March 1995, p. 37-41.
27. Orozco Fernando D. Análisis Químico Cuantitativo. 10ª ed., Ed. Porrúa, México, 1978.

28. Paredón Delgado Juan. Aplicaciones de los Métodos Electroquímicos a los Estudios de Corrosión. Tecnolab-CFE, México, octubre 1986, pag. 23-37.
29. Pelczar M.J., Roger D. R., Microbiology. Ed. McGraw-Hill, New Delhi. 1979.
30. Pérez Delgado Jaime. Determinación del Potencial en Acero Estructural en Presencia de Corrosión Microbiológica Inducida por *Desulfovibrio desulfuricans*. Tesis Facultad de Química-UNAM, C.U. México, 1990.
31. Perry H. Robert y Chilton C. Biblioteca del Ingeniero Químico. 2ª ed., Ed. McGraw-Hill, Vol. 6, Sección 23, México, 1986.
32. Rose H. A. Microbiología Química Introducción a la Fisiología Microbiana. Ed. Alhambra, España. 1977.
33. Sanders, P.F. Biological and Corrosion Activities of Sulphate-Reducing Bacteria in Industrial Process Plant. NACE 8, U.S.A., 1985, p. 131-136.
34. Schleicher Carl L. Ozone Handcuffs a Troublesome Trio. Water Technology, Vol. 18, No. 5, U.S.A., may 1995, pag. 31-35.
35. Scully J.C. The Fundamentals of Corrosion. 3rd ed., Ed. Pergamon Press, Oxford England, 1990.
36. Skoog Douglas A. y Donald M. West. Química Analítica. 4ª ed., Ed. McGraw-Hill, Madrid España, 1989.

37. Sprowls, Donald O. Interpretation and Use of Corrosion Test Results. ASM Handbook, Vol. 13 Corrosion, U.S.A., 1992, p. 316-317.
38. Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data, G16-88, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.02, Philadelphia U.S.A., 1992, p. 84-90.
39. Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing, G3-89, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.02, Philadelphia U.S.A., 1991, p. 56-61.
40. Standard Practice for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion, G46-76, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.02, Philadelphia U.S.A., 1992.
41. Stephen D. Allen. Insolation and Examination of Anaerobic Bacteria. Manual of Clinical Microbiology, p. 413-414.
42. Stoecker, John G. Evaluation of microbiological Corrosion. ASM Handbook, Vol. 13 Corrosion, U.S.A., 1992, p. 314-315.
43. Sydney H. A. Introducción a la metalurgia física. Ed. McGraw-Hill, México, 1981.
44. Tejada C. Silvia. Glosario de Términos de Corrosión. 2ª ed. Por publicar, México, 1995.
45. Tejada, S. Corrosión Microbiológica. ICTY 15, 200, México, 1993.

- 
46. Tiller, A.K. A review of the Europa Research effort on Microbial Corrosion between 1950 and 1984. NACE No. 8, U.S.A., 1985, p. 8-26.
  47. Trethewey Kenneth R. and J. Chamberlain. Corrosion for Students of Science and Engineering. Ed. Longman Scientific & Technical, London England, 1988.
  48. Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis. 5th ed., Ed. Longman Scientific & Technical, England, 1989.
  49. Warren, P. Biological Corrosion. Advances in Corrosion Science and Technology, Vol. II, Washington D.C U.S.A., 1972, p. 1-41.
  50. Uhlig Herbert H. and Revie R. Winston. Corrosion and Corrosion Control. 3th ed., Ed. John Wiley & Sons Inc., U.S.A., 1985.