

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

**INSTITUTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



***“Diseño y Construcción de un Dispositivo para Caracterizar
Procesos Tribológicos Erosión-Corrosión”***

TESIS

para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería

Presenta:

Ángel So Martínez

Director:

M.Sc. Michael Schorr

Co-Director:

Dr. Benjamín Valdez Salas

Mexicali, B. C.

Noviembre de 2009

Agradecimientos

Al desarrollar este trabajo, empecé un nuevo objetivo en mi vida el cual ha sido concluido. Agradezco a todos los maestros, quienes colaboraron en el desarrollo de tal proyecto. Gracias a mi familia quienes me apoyaron en el transcurso de esta nueva experiencia, en especial a mi hermano Jaime So Martínez.

Agradezco sinceramente al Dr. Benjamin Valdez Salas y al Dr. Miguel Schorr Wiener por su apoyo y guía en la preparación de esta tesis.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por haberme otorgado el financiamiento para el estudio de postgrado.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Resumen	1
Objetivo general	1
Objetivos particulares	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	2
1.1 Introducción	2
1.2 Antecedentes científicos	2
1.3 Corrosión en agua	2
1.4 Erosión-corrosión	3
1.5 Erosión-corrosión en turbinas.	3
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Corrosión	7
2.2 Fundamentos de corrosión	9
2.3 Efectos ambientales	9
2.4 Metalurgia	12
2.5 Costos de corrosión en la industria	15
2.6 Formas de corrosión	16
2.7 Erosión-corrosión	19
2.8 Prevención de la erosión-corrosión	26
CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS	27
3.1 Técnicas gravimétricas	27
3.2 Técnicas electroquímicas	29
3.3 Medición de potenciales	29
3.4 Relación de potencial y corriente de corrosión	30
3.5 Acero al carbono	33
3.6 Agua con lodo (slurry)	33
3.7 Clasificaciones de suelos para slurries	34
3.8 Dispositivo de rotación de la probeta	35
3.9 Dispositivos para medir erosión-corrosión	40
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSION	42
4.1 Resultados gravimétricos	42
4.2 Resultados electroquímicos	43
4.3 Evaluación de superficies de probetas metálicas	48
CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFIA	52

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3.1 Conversiones entre corriente, pérdida de peso y velocidad de corrosión para todos los metales	28
Tabla 3.2 Conversiones entre corriente, pérdida de peso y velocidad de corrosión para aceros	28
Tabla 3.3 Potenciales de electrodos de referencia	29
Tabla 3.4 Dispositivos de medición de erosión-corrosión	41
Tabla 4.1 Medición de erosión-corrosión	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Turbina de vapor	4
Figura 1.2 Corrosión detectada por depositos alcalinos sobre ejes, discos y alabes	5
Figura 1.3 Erosion-corrosión sobre el rotor y los alabes mostrando el patron direccional	6
Figura 2.1. Reacciones electroquímicas durante la corrosión del hierro en un electrolito en presencia de oxígeno	8
Figura 2.2. (a) y (b) Corrosión en el fondo de contenedores de petróleo por microorganismos después de 10 y 18 años de servicio	10
Figura 2.3. Corrosión por picaduras en tubería de suministro de agua a causa de corrientes parásitas	11
Figura 2.4. Estructuras cristalinas en metales: (a) cúbica centrada en el cuerpo, (b) cúbica centrada en las caras y (c) hexagonal compacta	12
Figura 2.5. Costos de la corrosión en industrias por sectores	15
Figura 2.6. Producción y manufactura	16
Figura 2.7. Formas comunes de corrosión	18
Figura 2.8. Diagrama esquemático de erosión-corrosión	19
Figura 2.9. Erosión-corrosión en una tubería de bronce transportado agua de mar	20
Figura 2.10. Ciclo de erosión-corrosión	20
Figura 2.11. Alabe de bomba afectada por erosión-corrosión en la succión	22
Figura 2.12. Fenómeno de cavitación en propela	23
Figura 2.13. Daños por el efecto de cavitación en la succión de una bomba	23
Figura 2.14. Representación esquemática de los pasos de cavitación	24
Figura 2.15. Alabe de una bomba de aleación níquel en ácido clorhídrico afectada por cavitación	25
Figura 2.16. Desgaste por fricción de un eje	25
Figura 3.1. Diagrama esquemático para la medición del potencial de un espécimen (ASTM estándar G3)	30
Figura 3.2. Diagrama esquemático de un sistema de medición potencial-corriente	31
Figura 3.3. Curvas típicas de polarización anódica y catódica	31
Figura 3.4. Diagrama esquemático del sistema de electrodo rotatorio	36
Figura 3.5. Mediciones de probetas	37
Figura 3.6 Medición y tratamiento de arena erosiva	37
Figura 3.7. Dispositivo de rotación de probeta	38
Figura 3.8. Conexión del electrodo de trabajo con el potencióstato	39
Figura 3.9. Celda electroquímica	40
Figura 4.1. Curva de polarización del acero en agua 2 horas de inmersión	43

Figura 4.2. Curva de polarización del acero en agua y arena 4 horas de inmersión	Pág. 44
Figura 4.3. Curva de polarización del acero en agua y arena 6 horas de inmersión	45
Figura 4.4. Curva de polarización del acero en agua y arena 8 horas de inmersión	46
Figura 4.5. Comparación de curvas de polarización del acero a través del tiempo en inmersión	47
Figura 4.6 Evaluación de la superficie del acero en agua. Se aprecia el patrón corrosivo sobre la superficie a una velocidad de rotación de 350 (RPM)	48
Figura 4.7 Evaluación de la superficie del acero en agua. Se observa un mayor impacto en el patrón corrosivo por la velocidad de rotación de 550 (RPM)	48
Figura 4.8 Evaluación de la superficie del acero en agua y sólidos (149 μm), velocidad de rotación 350 (RPM). Se observa un patrón erosivo por el tamaño de grano, ranuras y perforaciones	49
Figura 4.9 Evaluación de la superficie del acero en agua y sólidos (149 μm), velocidad de rotación 550 (RPM). Se aprecia que con el cambio de velocidad incrementan los impactos	49
Figura 4.10 Evaluación de la superficie del acero en agua y sólidos (74 μm), velocidad de rotación 350 (RPM). Se observa una erosión de menor impacto sobre superficie	50
Figura 4.11 Evaluación de la superficie del acero en agua y sólidos (74 μm), velocidad de rotación 550 (RPM). Se aprecia que se incrementa el impacto debido a la velocidad.	50

RESUMEN

La investigación está basada en el problema de la degradación de materiales y aleaciones metálicas en la industria, en la cual se trasladan fluidos que contienen partículas sólidas en suspensión. El problema es la erosión-corrosión (EC) que se produce al manejar este tipo de ambientes en sistemas industriales. Después de obtener resultados sobre tal investigación, se podrán tomar los datos arrojados para una mejor selección de metales y aleaciones el cual se expondrá a un sistema industrial. Igualmente el diseño será fundamental para esta selección, ya que estará expuesto en un medio ambiente agresivo. Todos esto factores harán que la eficiencia de equipos industriales aumente, así como reducirá pérdidas económicas en las empresas por no estar rezagando la producción debido al cambio de equipos o elementos industriales.

Objetivo general. Diseñar un dispositivo de medición del fenómeno de EC y emplear una metodología que permita evaluar e interpretar los datos obtenidos.

Objetivos particulares. Observar el efecto de la EC en metales y aleaciones usados en ambientes altamente corrosivos así como también en fluidos con partículas sólidas en suspensión por ejemplo lodos (slurries).

CAPITULO 1 ANTECEDENTES

1.1 Introducción.

Para el desarrollo de la investigación de erosión-corrosión (EC) se ha llevado a cabo una revisión exhaustiva de artículos científicos, que han aportado información relevante sobre el tema. El impacto del efecto combinado de erosión-corrosión, es un claro ejemplo de la problemática real en la industria, donde se encuentran ambientes químicamente agresivos y sistemas en movimiento con alto contenido de sólido.

1.2 Antecedentes Científicos.

Existen dispositivos para medir la EC entre ellos dos instrumentos han tenido gran uso llamados Erosión Corrosión Unit (ECU) y Erosión Corrosión Tester (ECT). Mediante estos instrumentos se simula el impacto de las fuerzas químicas y mecánicas que actúan en equipos industriales. En el primero se trata de un espécimen en rotación expuesto a un chorro de una mezcla de lodo (slurry). El ECT consiste de un eje en rotación que aplica abrasión en un medio lodoso sobre una probeta o disco estático. En ambos dispositivos existe un sistema de tres electrodos (referencia, auxiliar y la probeta expuesta a los factores químicos y físicos) los cuales son usados para evaluar la corrosión electroquímica. Ambos instrumentos miden la erosión mecánica y la corrosión electroquímica que actúan en forma combinada.

1.3 Corrosión en agua.

Un aspecto dominante en cualquier situación de corrosión es el ambiente. Las características pueden ser complejas y variadas, desde ambientes altamente

corrosivos como ácidos y la interacción de partículas sólidas en una solución acuosa. Pero ya en situaciones prácticas es importante tener en cuenta que la variación del ambiente es susceptible a cambios con tiempo y condiciones. Es de gran importancia darse cuenta que el ambiente que realmente afecta al metal corresponde a las condiciones microambientales a las que están sometido, es decir, el ambiente local sobre la superficie del metal. Es de esta manera, el deterioro por corrosión será función de la actividad generada por este ambiente.

1.4 Erosión-corrosión.

Este tipo de corrosión es caracterizado por la aparición de ondas, agujeros redondos y ranuras, estas pruebas muestran un claro patrón de deterioro en las superficies metálicas y en general están relacionados con el tipo y dirección del flujo. El término combinado de Erosión-corrosión es la aceleración y deterioro de superficies metálicas debido a la interacción de un fluido corrosivo y un movimiento relativo sobre la superficie metálica. Se deben tomar en cuenta varios factores dentro de este tipo de corrosión, como son la película superficial del metal o aleación, la velocidad del fluido, turbulencia en ciertos equipos, efectos galvánicos, daños por cavitación y fricción de materiales bajo una carga determinada (presión).

1.5 Erosión-corrosión en turbinas

La energía geotérmica (EG) es renovable y confiable, se obtiene de agua subterránea a través de pozos perforados y es utilizada para producir la electricidad en centrales eléctricas. Se obtiene una mezcla de agua salada y vapor; el vapor es separado, procesado y transformado a fluido de trabajo utilizado para la rotación de las turbinas de vapor (TV). Las plantas eléctricas de EG no contribuyen con dióxido

de carbono (CO_2) hacia la atmósfera, un factor importante para la emisión de gases efecto invernadero. Las centrales eléctricas geotermales operan en México por ejemplo Cerro Prieto y en el sur de California. La turbina de vapor es la máquina más eficiente para convertir energía de calor en trabajo mecánico; es un componente crítico en centrales termoeléctricas. Consta de un rotor apoyado sobre rodamientos y está adjunto en una carcasa cilíndrica. El chorro de vapor es dirigido hacia los álabes para encausar el movimiento del rotor. Las turbinas de vapor operan en centrales eléctricas geotérmicas o termales; en la Figura 1 se muestra el rotor de una turbina de vapor.

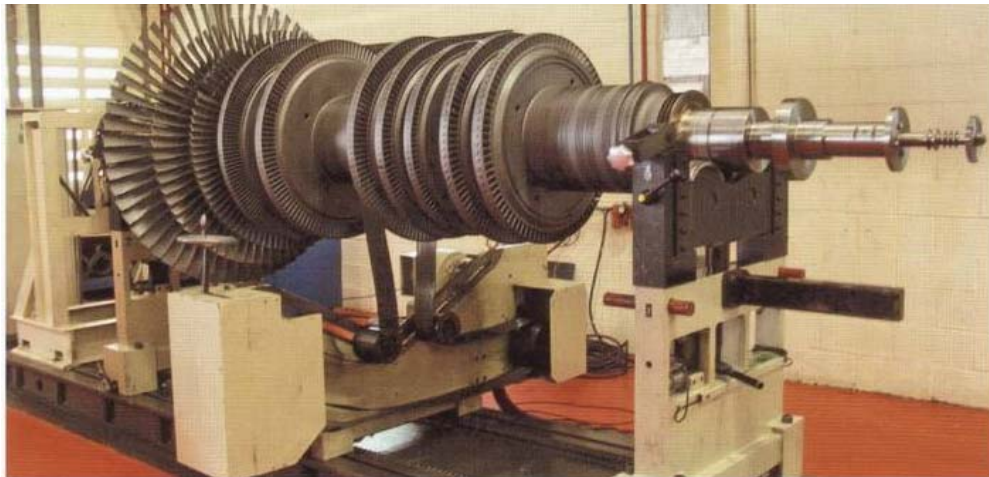


Figura 1.1 Turbina de vapor. (Fuente: Materials Performance Vol.48, Septiembre 2009)

Las turbomáquinas como turbinas, bombas, y compresores transfieren energía de un fluido a un rotor o de un rotor hacia un fluido. Están compuestos de dos componentes; el estático: la carcasa, y dinámico: cuerpo rotante. La turbina de vapor exhibe una simetría circular y cilíndrica, y a consecuencia de su rotación, una distribución radial y longitudinal de los depósitos y los productos de corrosión. La erosión-corrosión ocurre en muchos sistemas de flujos de fluidos. Es común en lodos (slurries) como las obtenidas por la digestión ácida de minerales, y por la acción de especies corrosivas y partículas sólidas en suspensión. Este tipo de

corrosión es un problema frecuente en equipos rotativos como agitadores de reactores, bombas centrífugas, centrifugadoras, y turbinas hidroeléctricas. La corrosión en una turbina de vapor se deriva de la combinación del agua y vapores químicos además las condiciones de operación mecánicas y termales. La Erosión-corrosión y corrosión bajo depósitos son los mecanismos predominantes de corrosión. Las impurezas del agua entran en el vapor de turbinas desde la caldera. Esta corrosividad se debe a las impurezas químicas como cloruros, sulfatos, hidróxidos sílice, y carbonatos.

Atacan las superficies de componentes de la turbina de vapor en forma de soluciones concentradas o por la formación de depósitos alcalinos o ácidos; estos productos de corrosión se adhieren a la superficie (Figura 2). Las altas velocidades de gotas de agua, los óxidos de metal, la sílice, y partículas sólidas alcalinas erosionan los discos y las superficies de los álabes, generando un patrón particular relacionado con la simetría circular y cilíndrica de turbina de vapor (Figura 3).

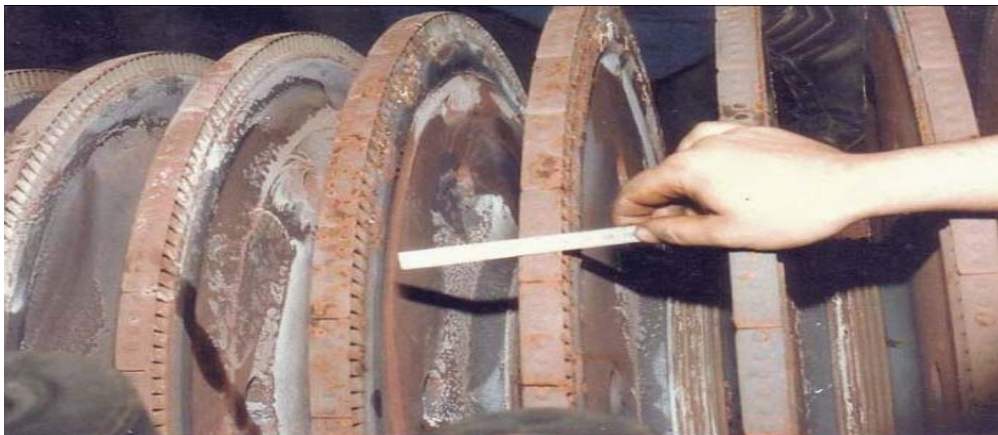


Figura 1.2 Corrosión detectada por depósitos alcalinos sobre ejes, discos y álabes. (Fuente: Materials Performance Vol.48, Septiembre 2009)



Figura 1.3 Erosión-corrosión sobre el rotor y los álabes mostrando el patrón direccional. (Fuente: Materials Performance Vol.48, Septiembre 2009)

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Corrosión.

La corrosión es un proceso químico o electroquímico en el cual la superficie del metal reacciona con su medio ambiente. Este proceso se debe a dos aspectos, un flujo de corriente y las reacciones químicas. La corriente fluye a través del metal por la migración de los electrones que es caracterizado por el enlace metálico. En los ambientes electrolíticos, el movimiento de los iones origina el flujo de corriente. Los iones son los átomos que han adquirido una carga eléctrica negativa o positiva por ganancia o pérdida de uno o más electrones. El electrolito es el medio a través del cual los iones pueden moverse, y el más común es el agua.

Una explicación más razonable es que los estados de cargas del ion y metal varían según el intercambio de electrones entre ellos. Por ejemplo, un ion positivo llega a formar un gas o depositarse como metal al obtener electrones del metal bajo corrosión. O viceversa, un átomo de metal se transforma en forma de ion, por la pérdida de electrones y disolución en el electrolito. Una característica importante del proceso de corrosión es que el proceso de oxidación está acompañado por una cantidad igual de reducción. La Figura 2.1 muestra la corrosión del hierro. El área donde los átomos de metal se disuelven en el ambiente como iones por la pérdida de dos electrones (oxidación) es llamado "ánodo". Aquí una cantidad de metal se pierde. Por otra parte, el área donde el oxígeno disuelto en el electrolito se reduce en iones de hidróxido por adquirir electrones, es llamado cátodo y permite las reacciones entre oxígeno y agua a fin de que ningún cambio en el metal mismo tenga lugar. En la corrosión natural, el número de electrones generado en el ánodo debe ser igual al número de electrones consumidos en cátodo. En otras palabras, los electrones (carga negativa) se mueven desde el ánodo a través del metal hacia

el cátodo, y del cátodo a través del electrolito hasta el ánodo (Figura 2.1). Esto quiere decir que la corriente fluye entre los dos electrodos (el ánodo y el cátodo) y en la dirección opuesta el flujo de carga negativa como se muestra por la línea sólida, en la llamada "celda de corrosión".

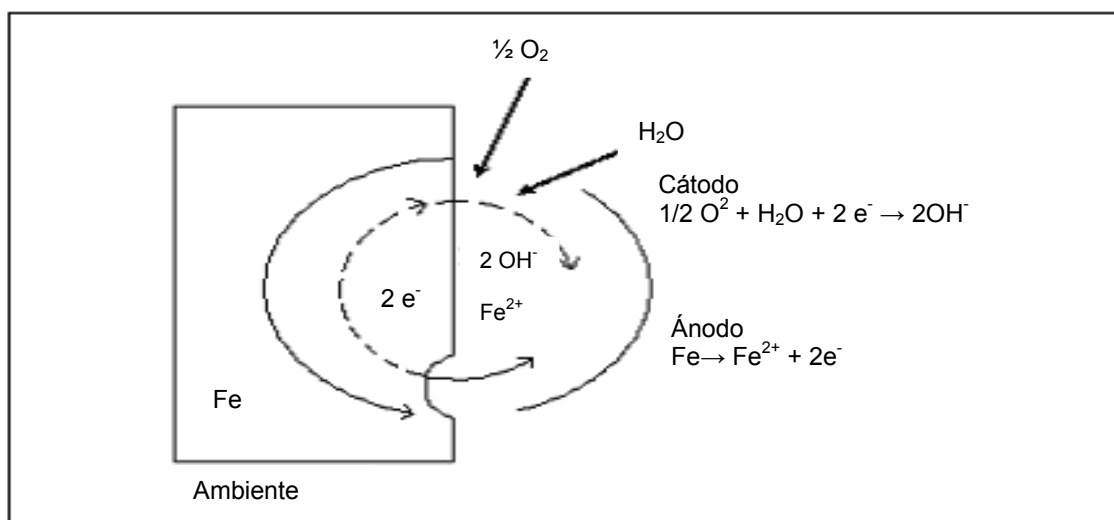


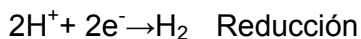
Figura. 2.1 Reacciones electroquímicas durante la corrosión del hierro en un electrolito en presencia de oxígeno. (Fuente: Duan C.G., Karelin V.Y.. Abrasive erosion and corrosion of hydraulic machinery. Vol.2, Imperial college press, 2002.

En el esquema anterior se observa la reacción anódica (oxidación) del metal es el siguiente:

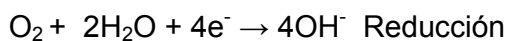
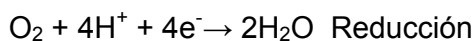


Sin embargo se dan diferentes reacciones catódicas, esto se debe a las características fisicoquímicas del ambiente. Las más comunes son:

Medio ácido



Medio neutro o básico



2.2 Fundamentos de Corrosión.

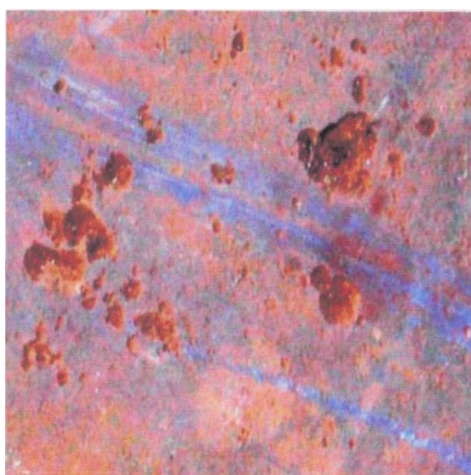
La ingeniería de corrosión, considera necesaria para la elección de un material el tomar en cuenta varios factores. Uno importante es el comportamiento corrosivo. Aunque nosotros estamos principalmente preocupados con la resistencia a la corrosión de varios materiales, nuestra elección final frecuentemente depende de otros factores. Los costos y la resistencia a la corrosión de los materiales, usualmente son las más importantes propiedades en la aplicación de ingeniería. Sin embargo, para aplicaciones arquitectónicas, la apariencia es a menudo la más importante consideración. La fabricación, que incluye la fácil formación, soldadura y otros aspectos operacionales mecánicos, deben ser considerados. En aplicaciones de ingeniería, el comportamiento mecánico es también importante y tiene que ser considerado aunque el material haya sido seleccionado por su resistencia a la corrosión. La resistencia a corrosión o resistencia química depende de muchos factores; su estudio completo y comprensivo requiere conocimiento de varios campos científicos. La termodinámica y electroquímica son de gran importancia para el entendimiento y control de la corrosión. La fisicoquímica y sus disciplinas son muy útiles en el estudio de los mecanismos de reacciones corrosivas, las condiciones de superficie de los metales y otras propiedades básicas.

2.3 Efectos ambientales

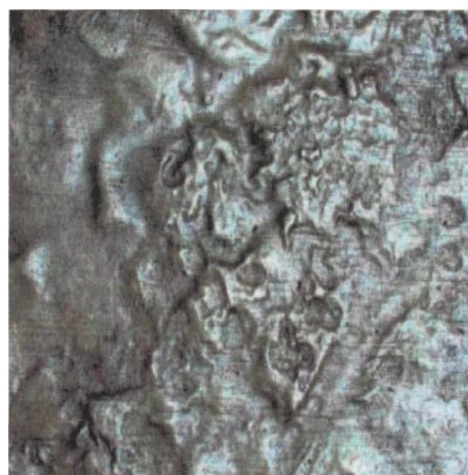
Algunos contaminantes se presentan en el ambiente en pequeñas cantidades y tienen mayor influencia en el comportamiento corrosivo de materiales que la mayor cantidad de los constituyentes del mismo ambiente. Algunas veces los contaminantes dejan un rastro que acelera el ataque de corrosión mientras que otras veces actúan como inhibidores. La interacción de algunos iones metálicos

como cobre, plomo, o mercurio puede causar corrosión en equipos de aluminio.

Presencia de Microorganismos. Los microorganismos están presentes en los suelos, en el agua dulce, el agua de mar, y el aire. La detección de microorganismos en un ambiente no indica un problema de corrosión, pero la mayoría de las tuberías bajo tierra son atacadas por la corrosión debido a la acción bacteriana. En ambientes no aireados o anaeróbicos, este ataque es atribuido a la influencia de bacterias sulfato reductoras por sus siglas en inglés (SRB) (Figura 2.2 a y b). Se efectúa por dos vías de ataque al acero; a causa del sulfuro de hidrógeno y la depolarización catódica auxiliada por la presencia de bacterias. En terrenos aireados o aeróbicos, hay variaciones grandes en la aeración donde la acción de SRB no debe omitirse. La mayoría de las fallas de corrosión en suelos han sido observadas debido a la acción microbiana y a la mayoría de aleaciones metálicas que son susceptibles a alguna forma de corrosión microbiológicamente inducida por sus siglas en inglés (MIC). La presencia de estos microorganismos son agresivos para sistemas de agua industrial, en tanques de almacenamiento, sistemas de cañerías, y toda clase de centrales eléctricas, incluyendo las de combustibles fósiles, hidroeléctricas, y nucleares.



a)



b)

Figura 2.2 a) Corrosión en el fondo de contenedores de petróleo por microorganismos después de 10 y b) 18 años en servicio. (Fuente: Materials Performance Vol.48, Septiembre 2005)

Corrientes parásitas. La corrosión por pérdidas de corrientes es inducida por fuentes externas similares a las celdas galvánicas que generan su propia corriente. Sin embargo, la amplitud de pérdidas de corrientes se considera superior que la corriente producida por celdas galvánicas comunes y esto acelera la corrosión. Otra diferencia entre corrientes del tipo galvánico y pérdida de corrientes es que la primera tiene mejor probabilidad de funcionar sobre las largas distancias desde que el ánodo y el cátodo tienen mejor probabilidad de ser remotamente separados del uno al otro. Buscando el camino de menor resistencia, las corrientes parásitas de una instalación externa pueden viajar a lo largo de una tubería o alguna otra estructura metálica enterrada causando una corrosión severa al transportador de corriente (Figura 2.3).



Figura 2.3 Corrosión por picaduras en tubería de suministro de agua a causa de corrientes parásitas. (Fuente: R. Roberge Pierre. Corrosion Engineering Principles and Practice. McGraw-Hill, Inc. 2008).

2.4 Metalurgia.

La mayor parte de los metales y aleaciones se cristalizan al solidificarse. Los átomos o iones de un sólido están ordenados según una disposición llamada celda unitaria que se repite en las tres dimensiones, para formar un sólido de estructura cristalina. La mayor parte de los metales al solidificarse se cristalizan formando tres estructuras de empaquetamiento compacto: cúbica centrada en el cuerpo por sus siglas en inglés (BCC) aceros, cúbica centrada en las caras por sus siglas en inglés (FCC) para aceros inoxidables y hexagonal compacta por sus siglas en inglés (HCP) al magnesio, esta última posee una modificación más densa de la estructura cristalina hexagonal sencilla (Figura 2.4).

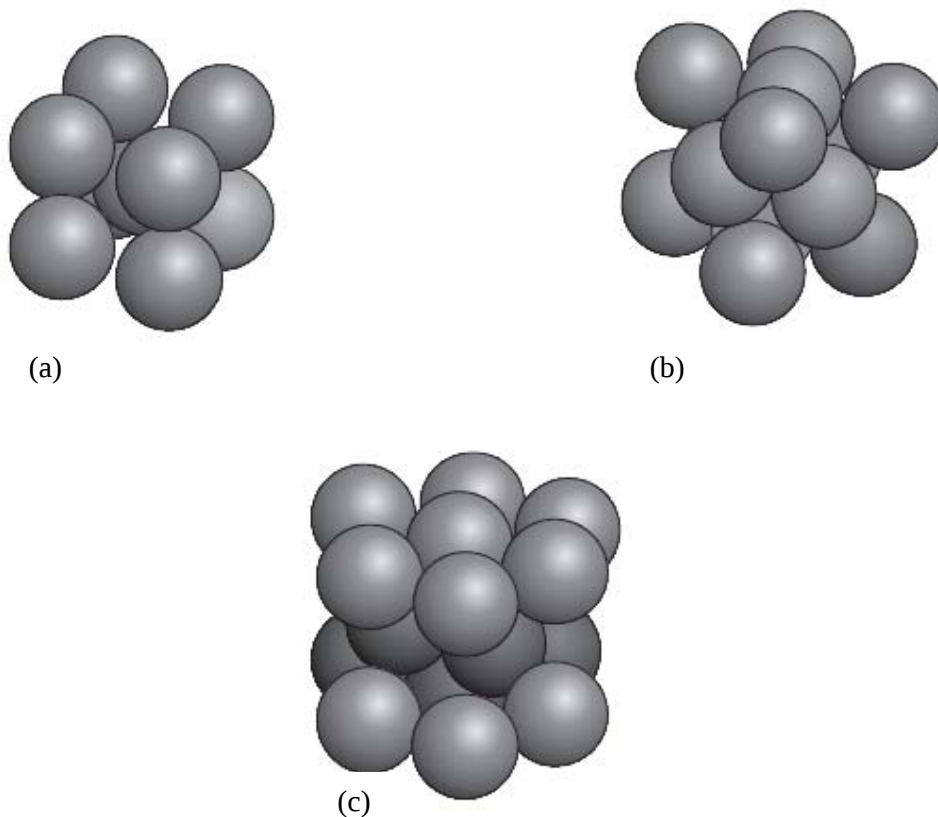


Figura 2.4 Estructuras cristalinas en metales: (a) cúbica centrada en el cuerpo, (b) cúbica centrada en las caras y (c) hexagonal compacta. (Fuente: R. Roberge Pierre. Corrosion Engineering Principles and Practice. McGraw-Hill, Inc. 2008).

Los metales dúctiles (pueden deformarse plásticamente sin fracturarse) son buenos conductores de electricidad y de calor. Estas propiedades resultan de la unión no direccional de metales; Es decir, cada átomo es compartido con muchos de sus vecinos. Por lo tanto, las estructuras cristalinas son simples y estrechamente empaçadas. La ductilidad es probablemente la propiedad más importante de los metales, ya que permite una fabricación ilimitada. Más allá, cuándo los metales son expuestos a esfuerzos de tensión, usualmente producen plasticidad antes de fracturarse, esta propiedad que es invaluable en aplicaciones de ingeniería. Una vez formados núcleos estables en un metal en proceso de solidificación, estos crecen hasta formar cristales. En cada cristal los átomos están ordenados en una disposición esencialmente regular, pero la orientación de cada cristal cambia.

Cuando un metal se solidifica durante una fundición, los átomos, los cuales están distribuidos al azar en el estado líquido, se arreglan entre ellos mismos en un orden cristalino. Sin embargo, este ordenamiento usualmente comienza en muchos puntos de la fase líquida, y como estos bloques de cristales o granos crecen hasta encontrarse en los puntos de intersección, se presenta una incompatibilidad en sus límites. Cuando el metal ha solidificado y enfriado, existirán numerosas regiones de incompatibilidad entre cada grano. Estas regiones son llamadas límites de grano.

La configuración más estable del metal es su cuadrícula de cristal, en donde los límites de grano son área de concentración de energía y están más activos químicamente. Por lo tanto, los límites de grano son atacados más rápidamente que las caras del grano cuándo están expuestas en un medio corrosivo. Las aleaciones son mezclas de dos o más elementos metálicos y no metálicos.

Hay dos clases de aleaciones: homogéneas y heterogéneas. Las aleaciones homogéneas son soluciones sólidas, en las cuales los componentes son completamente solubles uno en otro, y el material tiene sólo una fase. El hierro, níquel, cromo, y carbón son disueltos completamente, y la aleación tiene una composición uniforme. Las aleaciones heterogéneas son mezclas de dos o más fases separadas. Los componentes de tales aleaciones no son completamente solubles y por ello existen como fases separadas. La composición y estructura de estas aleaciones no son uniformes. El carbono se combina con hierro para formar carburo de hierro (Fe_3C). Cada tipo de aleación tiene ventajas y desventajas. Las aleaciones de solución sólida son generalmente más dúctiles y tienen fuerza inferior que las aleaciones heterogéneas. La elección entre estos dos tipos depende de las propiedades mecánicas deseadas. Las aleaciones de solución sólida son usualmente más resistentes a la corrosión que las aleaciones con dos (o más) fases. Las aleaciones son realmente similares a las soluciones acuosas. Algunas sustancias pueden ser disueltas, mientras que otras no son solubles. La solubilidad usualmente aumenta rápidamente con la temperatura, por ejemplo, el carburo de hierro (Fe_3C) es completamente soluble en hierro en altas temperaturas. Por lo tanto el acero se convierte en una solución sólida cuando es calentado a alta temperatura.

La precipitación de una fase puede ocurrir en soluciones sólidas supersaturadas como en el caso de soluciones líquidas. Otras diferencias en el metal pueden ser químicas, metalúrgicas, o mecánicas. Algunos ejemplos de impurezas son los óxidos, escamas, orientación de granos, una dislocación en el orden, diferencia en composición de microestructura y precipitación de fases. Las superficies altamente pulidas son usadas en casos especiales. Los metales puros son más resistentes a corrosión que materiales comerciales. Por ejemplo, el cinc

puro no se corroerá en ácido clorhídrico muy puro, pero sus contrapartes comerciales reaccionan rápidamente. Sin embargo, los metales puros son caros, y son usualmente débiles.

2.5 Costos de la corrosión en la industria

Los costos de la corrosión en la industria son de gran impacto en la economía mundial. Sólo se tienen especulaciones sobre costos debido a fallas generadas en distintos procesos industriales, CC Technologies Laboratorios, Inc., llevó a cabo un estudio con la colaboración de The U.S Federal Highway Administration (FHWA) y NACE en julio del 2002. Se presenten las pérdidas por corrosión en porcentajes de los diferentes sectores industriales. En las Figuras 2.5 y 2.6 se observan los costos promedios por corrosión en la industria.

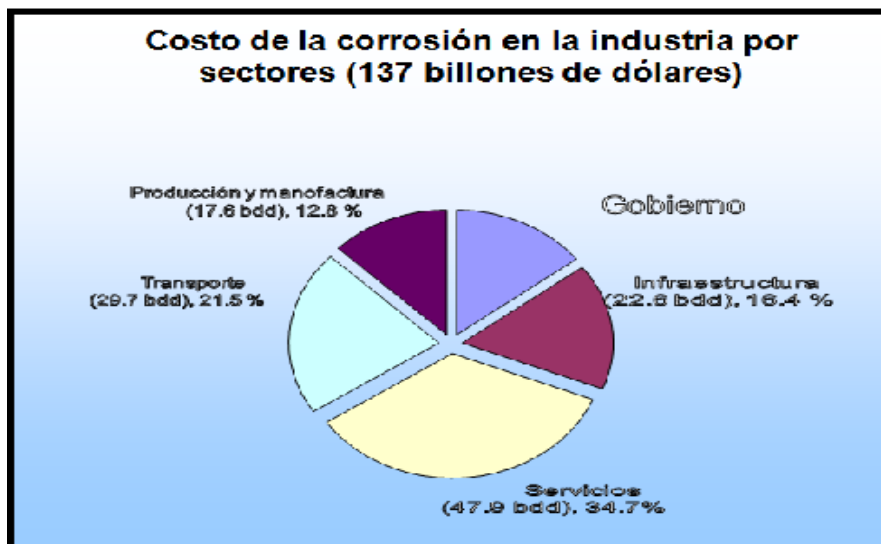


Figura 2.5 Costos de la corrosión en la industria por sectores.

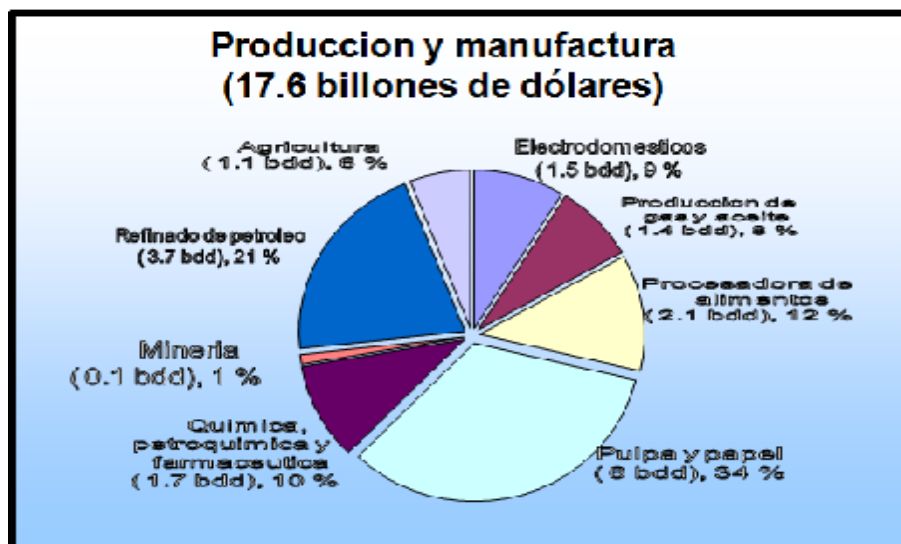


Figura 2.6 Producción y manufactura.

2.6 Formas de corrosión

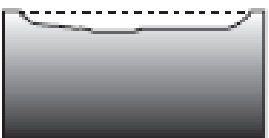
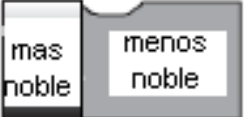
Las formas de corrosión se clasifican según la forma en que se manifiesta. Cada forma puede ser identificada por la observación visual, que en muchos casos es suficiente visualmente, pero algunas veces la amplificación es útil o requerida. Información valiosa para la solución de un problema de corrosión se obtiene a través de una observación detallada, por una experimentación con una probeta corroída o por fallas en maquinarias. La examinación antes de la limpieza es particularmente deseable.

Algunas de las ocho formas de corrosión son únicas, pero todas ellas están más o menos interrelacionadas. Las ocho formas son: (1) Uniforme, o corrosión general; (2) Galvánica, o corrosión con dos metales; (3) Corrosión por hendidura; (4) Corrosión por picadura; (5) Corrosión intergranular; (6) Corrosión selectiva; (7) Erosión-corrosión; (8) Corrosión por fatiga. La corrosión uniforme es normalmente caracterizada por una reacción electroquímica o química que procede uniformemente sobre la superficie expuesta. El metal muestra un proceso de desgaste uniforme y posteriormente falla. La corrosión localizada, es de mayor

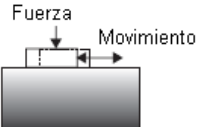
importancia en la industria, puede mostrar distintas formas y provocar fallas repentinas. La corrosión localizada consiste un ataque selectivo sobre el material que se manifiesta por corrosión en áreas pequeñas del metal en contacto con el ambiente o incluso algunas veces por debajo de recubrimientos o aislamientos. Los problemas de corrosión que ocurren debido a la conexión eléctrica de dos metales diferentes se le llama corrosión galvánica, y en los materiales en ingeniería o aleaciones se presenta este factor en forma de microislas. Usualmente los pequeños volúmenes de solución estancada entre empaques y superficie son causa de un ataque de corrosión por hendiduras. La caracterización de pequeñas cavidades en el metal, propicia que equipos industriales fallen a causa de pérdida de resistencia mecánica en su estructura, o fugas de líquidos o gases a través de orificios generados por un ataque de corrosión por picaduras, lo cual se manifiesta constantemente en la industria. Otro aspecto de fallas es a causa de impurezas en el límite de grano. A esta tipo de corrosión se le conoce como corrosión intergranular. Los procesos de corrosión intergranular tienden a acelerarse por fuerzas de tensión mecánica. En situaciones extremas se puede generar una ruptura, debido a esfuerzos a los que la estructura es sometida y se conoce entonces como agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC, por sus siglas en inglés). La Figura 2.7 muestra algunos tipos de corrosión que son comunes en la industria.

Las grietas de la superficie intergranular también pueden ser producidas por la presencia de hidrógeno, proceso conocido como fragilización por hidrógeno. También la pérdida de un elemento en una aleación metálica es un proceso de corrosión selectivo. Los fenómenos de cavitación y corrosión por fricción se presentan cuando hay presencia de factores de movimiento.

Inspección visual

 Corrosión uniforme	 Corrosión por picadura
 Corrosión por hendidura	 Corrosión galvanica

Identificable por instrumentos especiales

 Corrosión por erosión	 Corrosión por cavitacion
 Corrosión por fricción	 Corrosión íter granular

Examinación microscópica

 Corrosión por esfuerzo	 Corrosión por fatiga
 Corrosión por exfoliación	 Ataque interno

Figura 2.7 Formas comunes de corrosión. (Fuente: R. Roberge Pierre. Corrosion Engineering Principles and Practice. McGraw-Hill, Inc. 2008.

2.7 Erosión-corrosión.

Corrosión es la destrucción o deterioro de un material a causa de la reacción electroquímica con el medio ambiente. Erosión es la eliminación de material de la superficie por la acción de numerosos factores mecánicos por partículas sólidas o las partículas en suspensión en lodos (slurries). La erosión-corrosión (EC) es la aceleración o incremento del deterioro o ataque sobre el metal por un movimiento relativo entre un fluido corrosivo y la superficie del metal. Es el efecto conjugado de corrosión electroquímica y erosión-mecánica. Este fenómeno es muy rápido, y el efecto del desgaste mecánico o abrasivo está presente. El metal es removido de la superficie sólida en forma de partículas producto del desbaste que ocurre por el flujo abrasivo (Figura 2.8).

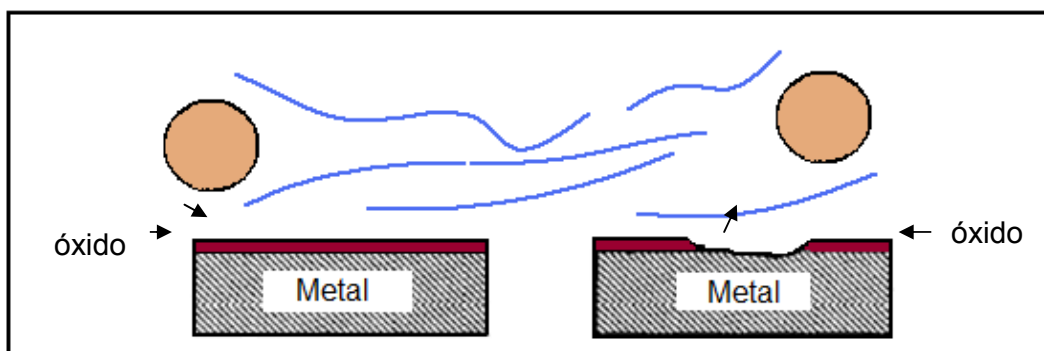


Figura 2.8 Diagrama esquemático de Erosión-corrosión(Fuente: G. Fontana Mars. McGraw-Hill. Corrosion Engineering. Inc. 1986.

La corrosión electroquímica conduce a la disolución de la superficie metálica en forma de iones metálicos y luego en productos de corrosión. La EC está caracterizada por la aparición de surcos y rayas, presentando generalmente un patrón direccional. La mayoría de los metales y aleaciones son susceptibles a la EC que aparece cuando la capa protectora es destruida y desgastada, y el metal o aleación son atacados rápidamente (Figura 2.9). Uno de los medios corrosivos que pueden causar la EC, son los sólidos en suspensión en líquidos (lodos).

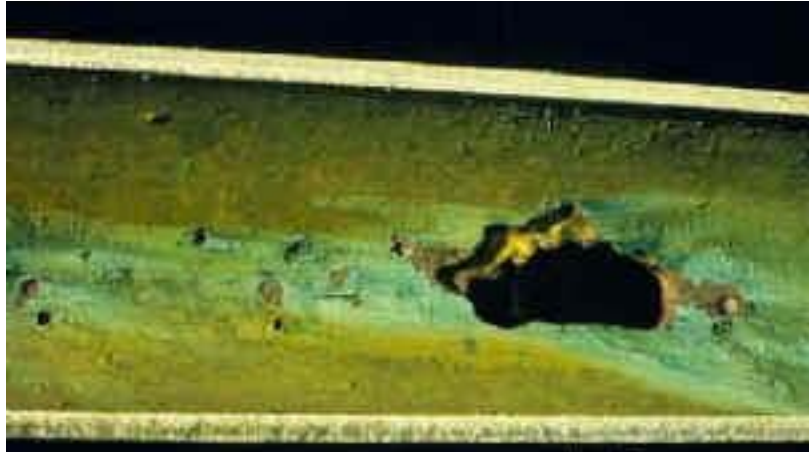


Figura 2.9 Erosión-corrosión de una tubería de bronce transportando agua de mar. (Fuente: www.nace.org)

La naturaleza y propiedades de las capas protectoras que se forman sobre algunos metales o aleaciones son muy importantes desde el punto de vista a la resistencia a la EC. La habilidad de estas capas de proteger el metal depende de la composición química, del medio, la presencia de partículas sólidas en suspensión y la velocidad de flujo de las soluciones y lodos. La dureza, la densidad, la adherencia y la continuidad de la capa protectora (surface film) proveerán una mejor protección que otras que son fácilmente eliminadas por medios mecánicos o desgaste. Una capa frágil que se agrieta bajo tensión puede ser protectora. El fenómeno de EC se caracteriza por su proceso cíclico (Figura 2.10).

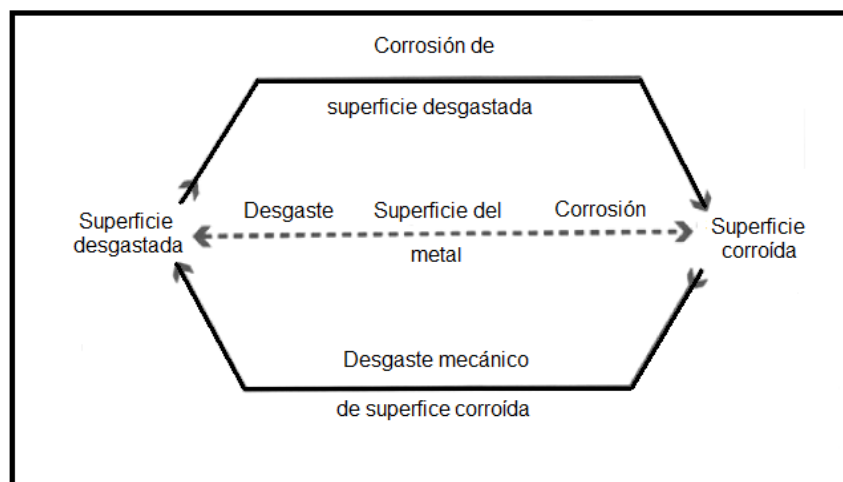


Figura 2.10 Ciclo de erosión-corrosión

La velocidad de un fluido o un lodo juega un papel importante en la EC. La velocidad a menudo influye fuertemente en los mecanismos de las reacciones de corrosión. La velocidad exhibe los efectos del desgaste mecánico con valores altos y particularmente cuando un fluido contiene partículas en suspensión. El incremento de la velocidad generalmente da como resultado un incremento de la intensidad del ataque. La EC puede ocurrir en metales y aleaciones que son completamente resistentes en medios con bajas velocidades.

Turbulencia. Otro factor que induce fallas es la turbulencia o condiciones de flujo turbulento. La turbulencia resulta en la agitación de un fluido en la superficie del metal. Probablemente los casos más frecuentes ocurren en este tipo de falla, por ejemplo, en el final de las entradas de tubos de condensadores y similar en carcasa-tubo de intercambiadores de calor, designado como corrosión en entrada del tubo. El ataque se localiza en los primeros centímetros del tubo en el final de la entrada. Existe turbulencia en esta área porque el líquido fluye desde una tubería larga (intercambiador de calor) a un diámetro menor (los tubos). El tipo de flujo obtenido depende de la rapidez y la cantidad del fluido manejado y también de la geometría o diseño del equipo. Cualquier alteración del flujo laminar debido a repentinos cambios en el flujo por cruces de secciones afiladas, sedimentos, grietas y obstrucciones darán como resultado a la EC. Impulsores y álabes son los típicos componentes que operan en condiciones turbulentas (Figura 2.11).

Impacto. Muchas de las fallas son directamente atribuidas al impacto. Las tuberías en posición vertical y horizontal no son afectadas pero la falla se da cuando el flujo del fluido es forzado a tomar otra dirección.



Figura 2.11 Álabes de bomba afectada por erosión-corrosión en la succión. (Fuente: www.nace.org)

Otros ejemplos son las aspas de las turbinas de vapor particularmente en la salida, codos, tes y otras aplicaciones donde las condiciones de impacto existen. Sólidos y burbujas de gas en los líquidos incrementan dicho efecto. Las burbujas de aire son un importante factor en la aceleración del ataque de impacto.

Efecto galvánico. La corrosión galvánica o la corrosión de dos metales diferentes pueden influir en la EC, cuando los dos metales distintos están en contacto dentro de un sistema de fluido. El efecto galvánico puede ser nulo bajo condiciones estáticas pero puede incrementarse cuando un fluido está presente. Los cambios de velocidades pueden producir efectos galvánicos. En agua de mar la corrosión del metal expuesto a bajas velocidades no es afectada apreciablemente con los pares de aceros inoxidables con cobre y níquel o titanio. Pero a velocidades altas el ataque es menor cuando tenemos una par de acero inoxidable y titanio que cuando tenemos uniones con cobre o níquel. Esto se debe a que el acero inoxidable y titanio presenta una polarización catódica a grandes velocidades.

Cavitación. Una forma especial de erosión-corrosión es la cavitación, es causada por la formación y colapso de burbujas de vapor en el líquido cerca a la superficie

del metal. Este fenómeno ocurre en turbinas hidráulicas, propelas de barcos, impeler de bombas y en todas las superficies donde una velocidad alta de flujo y el cambio de la presión son encontradas (Figura 2.12).



Figura 2.12 Fenómeno de cavitación en propela.

La apariencia de la cavitación es algo parecido a la corrosión por picadura excepto que en las áreas de picaduras son espacios más cerrados y la superficie es usualmente áspera. El daño por cavitación es resultado a de dos factores la corrosión y los efectos mecánicos. En el caso anterior, se asume que el colapso de las burbujas de vapor destruye la película de superficie protectora y es ahí cuando se incrementa la corrosión (Figura 2.13).



Figura 2.13 Daños por el efecto de cavitación en la succión de una bomba. (Fuente: www.nace.org)

El daño por cavitación se le atribuye a los efectos corrosivos y mecánicos. El diagrama esquemático muestra la secuencia Figura 2.14. (1) Una burbuja de cavitación se forma en la película protectora. (2) Después la burbuja se colapsa y destruye la película. (3) Se genera una nueva superficie del metal corroída y la película se reforma. (4) Una nueva burbuja de cavitación se forma en el mismo punto. (5) La burbuja colapsa destruyendo la película protectora. (6) El área expuesta se corroe, ocasionando una profunda perforación. La repetición de este proceso ocasiona los daños por pequeñas perforaciones en la superficie del material.

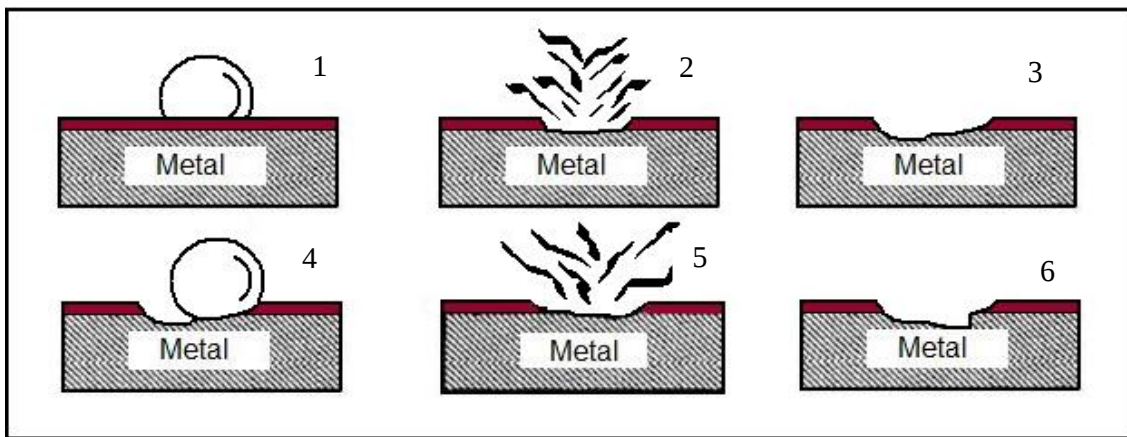


Figura 2.14 Representación esquemática de los pasos de cavitación. (Fuente: G. Fontana Mars. McGraw-Hill. Corrosion Engineering. Inc. 1986.

En general, el daño por cavitación puede ser prevenido usando técnicas para la prevención de la erosión-corrosión o tomando medidas específicas. La cavitación puede reducirse cambiando el diseño de la equipos de turbo maquinaria para minimizar presiones hidrodinámicas. La selección de materiales resistentes a la corrosión es una buena opción para evitar el fenómeno (Figura 2.15). Acabados suaves en impelentes de bombas y propelas reducen los daños ya que estos acabados suaves no proveerán sitios adecuados para la formación de burbujas.



Figura. 2.15 Álabes de una bomba de aleación níquel en ácido clorhídrico afectada por cavitación.

Corrosión por fricción (Fretting). Ocurre en el contacto de áreas, entre materiales bajo una presión sujeto a vibración y barrido. Esto aparece como picaduras o rayaduras en el metal rodeado por productos corrosivos (Figura 2.16).



Figura 2.16 Desgaste por fricción de un eje. (Fuente: www.nace.org)

Corrosión por fricción es muy perjudicial por la destrucción de los componentes metálicos y la producción de residuos de óxido. Las rayaduras

ocurren a menudo, con pérdidas de tolerancias y apareamiento de partes desgastadas.

2.8 Prevención de la erosión-corrosión.

Se usan los cinco métodos de reducción o prevención de erosión-corrosión siguientes, enumerados en orden de importancia y uso decreciente.

1. Selección de materiales más resistentes.
2. Diseño adecuado.
3. Alteración del medio corrosivo.
4. Recubrimientos.
5. Protección catódica

CAPÍTULO 3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Técnicas gravimétricas.

Esta consiste en la medición de la pérdida de peso de un metal en contacto con una solución corrosiva y es la forma más simple de evaluar cuantitativamente el proceso de corrosión. Con este método se puede evaluar la velocidad de disolución del metal en un medio dado, aunque no proporciona idea alguna sobre el mecanismo de la corrosión, ni es posible hacer predicciones teóricas acerca de nuevos materiales. La pérdida de peso fue medida usando una balanza digital con precisión de 0.1 mg. Cada probeta fue pesada por lo menos 3 veces para obtener un promedio después de 10 horas de inmersión. La medición de pérdida de peso de una material en contacto con una disolución corrosiva, fue la primera manera de tener una evaluación cuantitativa del proceso de corrosión (Tablas 3.1 y 3.2). Después se relacionó la cantidad de material disuelta por corrosión en un tiempo dado, con la densidad y área del material en cuestión para poder calcular la pérdida de espesor del acero al carbono por unidad de tiempo, de la siguiente manera:

$$\text{g Fe/hr} \cdot 1\text{cm}^3\text{Fe}/7.8\text{g} \cdot \text{Fe} \cdot (1/\text{Área}) \text{cm}^2 = \text{cm. de penetración/hr}$$

Así, surgieron unidades de penetración de ataque muy conocidas, como mpy (mili pulgadas por año). Al combinar los principios de Faraday con reacciones electroquímicas específicas de estequiometría conocidas conduce a la ecuación (3.1) que relaciona la carga Q (Coulomb) con las descripciones químicas N y n :

$$Q = F \cdot \Delta N \cdot n \quad \text{ecuación (3.1)}$$

Donde:

N es el número de moles y ΔN los cambios de cantidad.

n es el número de electrones por molécula de las especies que reaccionan.

Tabla 3.1 Conversiones entre corriente, pérdida de peso y velocidad de penetración para todos los metales. Fuente: R. Roberge Pierre. Corrosion Engineering Principles and Practice. McGraw-Hill, Inc. 2008.

	mAcm^{-2}	mm y^{-1}	Mpy	$\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$
mAcm^{-2}	1	3.28 M/nd	129 M/nd	8.95 M/n
mm y^{-1}	0.306 nd/M	1	39.4	2.74 d
mpy	0.00777 nd/M	0.254	1	0.0694 d
$\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$	0.112 n/M	0.365/d	14.4/d	1

mpy = mili pulgadas por año, n = número de electrones libres por la reacción de corrosión, M = Masa atómica (g/mol), d = densidad (g cm^{-3}).

Tabla 3.2 Conversiones entre corriente, pérdida de peso y velocidad de penetración para aceros. Fuente: R. Roberge Pierre. Corrosion Engineering Principles and Practice. McGraw-Hill, Inc. 2008.

	mAcm^{-2}	mm y^{-1}	mpy	$\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$
mAcm^{-2}	1	11.6	456	249
mm y^{-1}	0.0863	1	39.4	21.6
mpy	0.00219	0.0254	1	0.547
$\text{g m}^{-2} \text{day}^{-1}$	0.00401	0.0463	1.83	1

La corriente de corrosión puede ser estimada por métodos electroquímicos especializados o usando pérdida de peso y convirtiéndolos con las Tabla 3.1 y 3.2, basada por los principios de Faraday. La Tabla 3.2 describe los factores de conversión para aceros (Fe) en donde $n = 55.85\text{g/mol}$ y $d = 7.88 \text{ g cm}^{-3}$

3.2 Técnicas electroquímicas

Los métodos electroquímicos son aplicados extensamente en investigaciones básicas del mecanismo de corrosión, en pruebas de corrosión, y en el control de corrosión de procesos químicos en la industria. Los instrumentos para los estudios electroquímicos de corrosión pueden ser tan simples como la medición de potencial en una celda electroquímica o tan sofisticada como una medición con el potencióstato que automáticamente produce y registra una curva de polarización.

3.3 Medición de Potenciales.

En la evaluación del proceso de corrosión, con la medición del potencial del metal corroído, se predice el comportamiento de corrosión, la determinación hacia una tendencia de corrosión galvánica, el desarrollo de pasividad o su anomalía, y el estudio de los efectos de inhibidores, oxidantes, cambios en propiedades de la solución y las condiciones impuestas de temperatura y agitación. El potencial de una aleación depende de su composición química y condición metalúrgica. El espécimen metálico está sumergido en una solución experimental, y su potencial es medido contra el potencial constante de un electrodo de referencia (Tabla 3.3). El potencial del electrodo se estabiliza en inmersión de 30 a 60 minutos.

Tabla 3.3 Potenciales de electrodos de referencia

El Electrodo Estándar		Potencial Volts
Hidrógeno (SHE)	$\text{Pt}/\text{H}_2 (a = 1) / \text{H}^+ (a = 1)$	0.000
Calomelano (SCE)	$\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{Satd. KC1}$	0.241
Plata- cloruro de plata	$\text{Ag}/\text{AgCl}/ 1\text{M KC1}$	0.235

El potencial de un metal es medido con un potenciómetro o un voltímetro electrónico de acuerdo al esquema mostrado en Figura 3.1. En este esquema la corriente que fluye en el circuito es muy pequeña o casi cero para evitar polarización del electrodo durante la medición. El principal requisito de la medición

del potencial de un circuito es una alta impedancia, y un medidor del pH con una escala adecuada de voltaje o panel digital que despliegue una adecuada determinación de potencial. La variación de potencial con el tiempo se registra para los comportamientos de corrosión o inactividad del acero de acuerdo con el esquema de la Figura 3.2. También nos permite investigar la aparición y la propagación de grietas por corrosión bajo esfuerzo de aceros inoxidables austeníticos dentro soluciones saturadas en ebullición de $MgCl_2$.

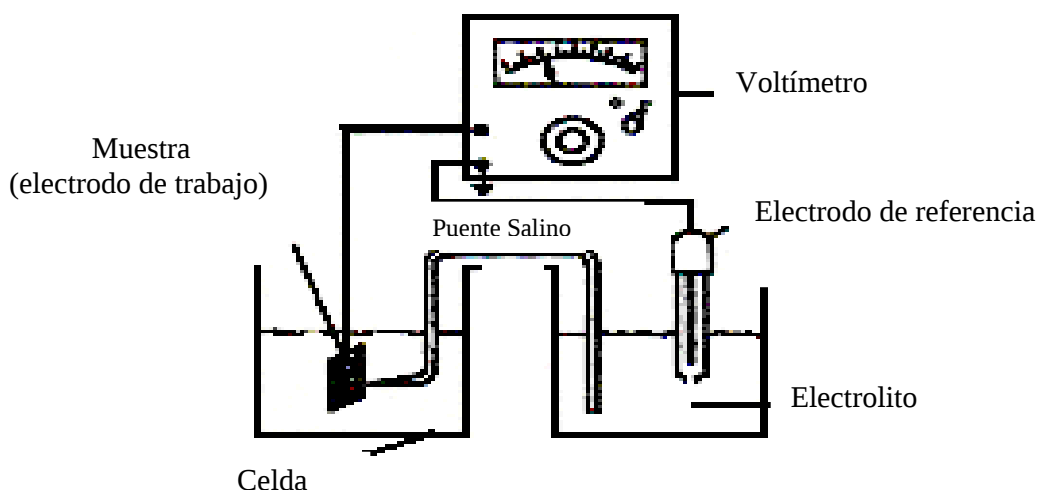


Figura. 3.1 Diagrama esquemático para la medición del potencial de un espécimen (ASTM G3-72, 2004).

3.4 Relación de potencial y corriente de corrosión.

Puesto que la corrosión es un proceso electroquímico en el cual la corriente y el potencial son los parámetros fundamentales, la determinación de la relación de potencial con la corriente, bajo las condiciones controladas producirá información en el mecanismo y la velocidad del proceso de corrosión. Estudiar el comportamiento de corrosión de un metal por medio de la curva polarización (Figura 3.3), en el cual las reacciones anódicas y catódicas son medidas separadamente en especímenes diferentes. Para las mediciones se utiliza una celda de polarización que contiene un sistema de tres electrodos: un espécimen metálico de prueba (el

electrodo de trabajo), un electrodo auxiliar, y un electrodo de referencia sumergidos en la solución corrosiva. Un potenciostato tiene la aplicación de mantener un potencial en el electrodo de trabajo versus el electrodo referencia mientras mide la corriente entre el electrodo de trabajo y el electrodo auxiliar. La combinación potenciostato-voltímetro proveen una alta impedancia que es requerida para las medidas de los potenciales con las curvas de polarización.

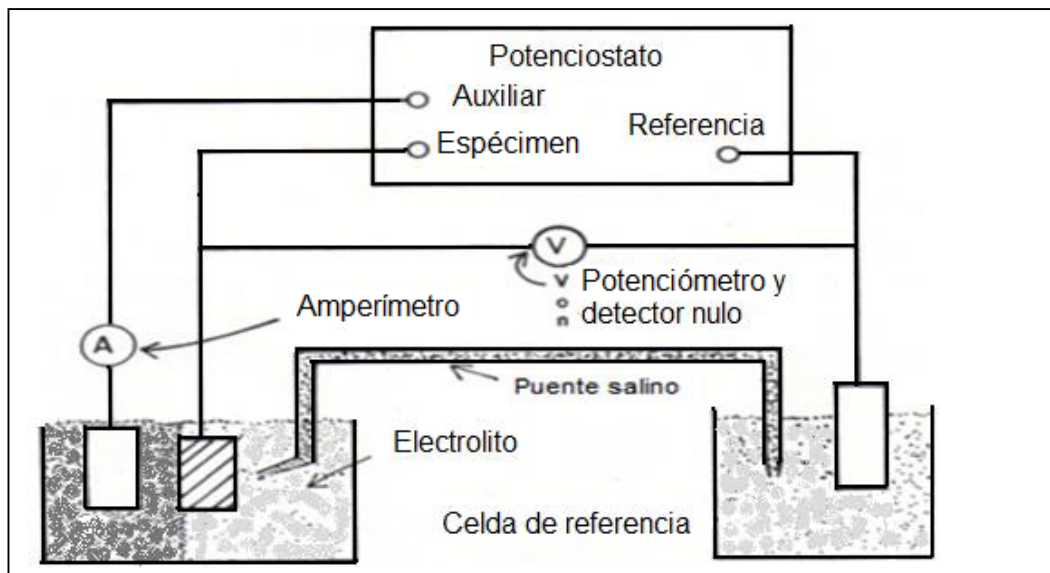


Figura 3.2 Diagrama esquemático de un sistema de medición potencial-corriente.

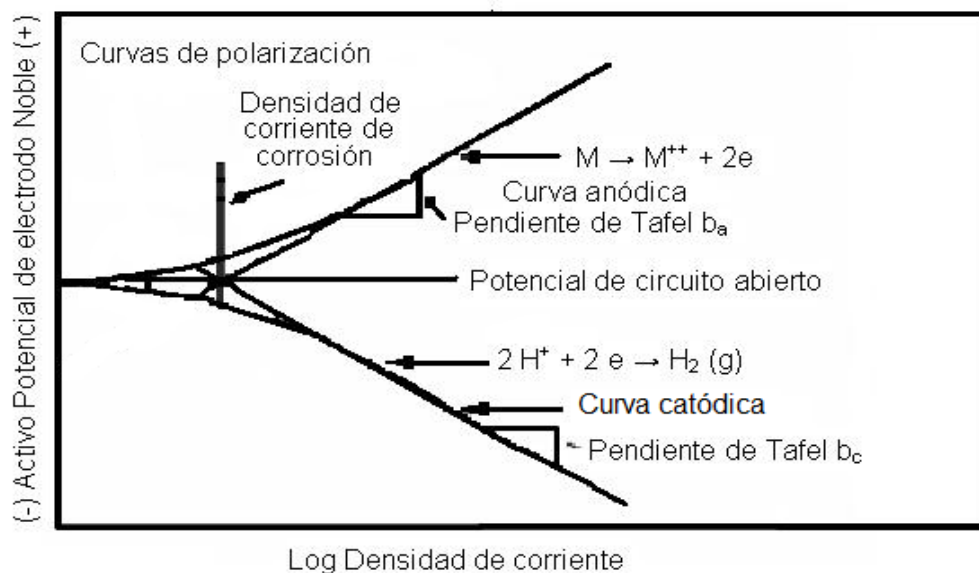


Figura 3.3 Curvas típicas de polarización anódica y catódica.

Los potenciostatos modernos contienen dispositivos electrónicos para digitalizar automáticamente los potenciales continuamente, convertidores logarítmicos, y registran las coordenadas X-Y para una reproducción de las curvas polarización potenciodinámicas. Si el potencial es graficado en contra de la corriente en formato semilogarítmico (de acuerdo con estándares ASTM G3 y G5), los diagramas de densidad de corriente serán, como los que aparecen en la Figura 3.3. Las convenciones de signos del potencial, densidad de corriente y su presentación gráfica están establecidas por el estándar ASTM G3. Las curvas son no lineales en bajas corrientes pero se vuelven lineales con una corriente más alta. Esta parte lineal del gráfico es llamada la región Tafel, y es caracterizada por las curvas anódica y catódica, con las pendientes de Tafel: b_a , b_c . Las curvas anódicas y catódicas son explicadas por la ecuación Tafel (3.2):

Donde:

$$\eta = a + b \log i \quad \text{ecuación (3.2)}$$

η = sobrevoltaje, la diferencia entre el potencial del espécimen y el potencial de corrosión

a = Una constante gráfica de la curva

b = La pendiente de Tafel

i = La densidad de corriente de sobrevoltaje η

Esta ecuación da como resultado una línea recta con pendiente b cuando η es graficado versus $\log i$. La medición potenciodinámica facilita las mediciones electroquímicas de velocidad de corrosión del material, en la mezcla de sólido-liquido (slurry). Para realizar esta medición una celda electroquímica fue conectada a un potenciostato (Gamry PC4-EASI). La celda está constituida por un electrodo de Ag/AgCl (electrodo de referencia), un electrodo de auxiliar de grafito y el electrodo de trabajo (acero al carbono). Los electrodos fueron colocados dentro del sistema del agitador. La rotación de las probetas fue controlada por un sistema STIR-PAK"

modelo 4554, con un rango de velocidad de rotación de 0- 2000 rpm. Las curvas de polarización fueron medidas con un potencial abierto de -0.7 V a 0.7 V (Ag/AgCl) con una velocidad de barrido de 5 mV/s.

3.5 Acero al carbono.

El contenido de carbón tiene un pequeño efecto en la resistencia de corrosión en los aceros. La dureza y la fuerza de los aceros dependen de su contenido de carbón y tratamiento térmico. Los aceros al carbono simples exhiben propiedades mecánicas en rangos: de tensión, 40 a 200,000 lb/ in²; de dureza entre 100 a 500 Brinell; de elongación, de un 5 a un 50 por ciento. El óxido consiste de óxidos de hierro y usualmente es óxido férrico hidratado. El acero al carbono es una aleación o combinación de cromo, níquel, cobre, molibdeno, fósforo, y vanadio para producir aceros de baja aleación. Adiciones superiores en una aleación son usualmente para mejorar su dureza y propiedades mecánicas. La resistencia en estos es más alta que en aceros al carbono simples, pero el atributo más importante es una mejor resistencia en ambientes corrosivos (soluciones acuosas).

3.6 Agua con lodo (Slurry).

Slurry es esencialmente una mezcla de partículas sólidas en suspensión en un medio líquido. Sus características físicas dependiente de muchos factores tales como tamaño y distribución de partículas, la concentración de sólidos en la fase líquida, el tamaño del conducto, nivel de la turbulencia, temperatura, y la viscosidad absoluta o dinámica del líquido.

3.7 Clasificaciones de suelos para lodos (slurries).

Existe una variedad de métodos utilizados para clasificar suelos. Dos principales clases son:

1. Suelos Cohesivos tales como ciertos cienos y arcillas con un diámetro de partícula mediana menor que 0.0625 mm (menos de 0.0025 in, o la malla 250).
2. Suelos no cohesivos tales como ciertos cienos y arcillas con un diámetro de partícula mediana más grande que 0.0625 mm (más grande que 0.0025 in, o la malla 250).

Flujos de slurry. Un slurry es una mezcla de un fluido y partículas sólidas en suspensión. El fluido más común es el agua, pero a través de los años, los intentos han sido para usar los aceites crudos en trituradoras de carbón, y también el aire neumático para transportar. El flujo de un slurry en una tubería de conducto es muy diferente del flujo de sólo el líquido. Un líquido con poca viscosidad absoluta (o dinámica) desarrolla bajas velocidades desde un flujo laminar a un flujo turbulento. Sin embargo una mezcla, tal como un slurry debe superar una velocidad crítica o una transición viscosa.

Flujos homogéneos. Los sólidos son uniformemente distribuidos a través del líquido. Un ejemplo de un flujo homogéneo es el cobre concentrado en lodo (slurry) después de experimentar un proceso de pulverización y espesamiento. Las partículas son muy finas y la mezcla está en una alta concentración (50-60 por ciento del peso). Como la concentración de partículas aumenta (después de 40 por ciento del peso para muchos

lodos), la mezcla se vuelve más viscosa y desarrolla propiedades no newtonianas. Además las altas concentraciones de lodo, lodo de barrenado, se comportan como flujos homogéneos. Las dimensiones de las partículas para una mezcla homogénea son menores de 40 μm a 70 μm (325-200 malla), dependiendo de la densidad de los sólidos.

Flujos heterogéneos. En un flujo heterogéneo, los sólidos no son uniformemente mezclados en el plano horizontal. Un gradiente de concentración existe en el plano vertical. La formación de dunas o una cama corrida de partículas pueden formarse en una tubería, con las partículas más pesadas al fondo y las más livianas en suspensión, por una velocidad crítica no adecuada. Las diferentes fases de un líquido y sólido, retienen sus propiedades y las partículas más grandes no causan necesariamente los problemas; depende realmente del radio en que están mezclados con las partículas más finas. Los lodos heterogéneos son encontrados en minería de roca fosfatada, y aplicaciones de arrastre.

La concentración de las partículas permanecen, menos del 25 por ciento del peso en muchas aplicaciones de arrastre y por debajo del 35 por ciento del peso en muchas aplicaciones de desechos. Los flujos heterogéneos requieren de una velocidad mínima

3.8 Dispositivo de rotación de la probeta.

El electrodo de trabajo, utilizado para las mediciones electroquímicas es de acero al carbono comercial. La probeta fue diseñada con dimensiones a proporción al contenedor del sistema de rotación. El sistema de rotación utiliza un motor de

velocidad variable, con un rango de velocidad de 0 a 2000 RPM. Con este rango de velocidad será posible trabajar con flujos turbulentos y será capaz de mantener una continuidad eléctrica a través de las mediciones, además de contar con una velocidad estable.

Para monitorear la continuidad eléctrica se utiliza un voltímetro digital, el cual se reportará como resistencia, esta deberá ser prácticamente cero para garantizar continuidad. Para monitorear la velocidad de rotación se empleara un tacómetro digital y se revisara durante períodos de tiempo para asegurar la misma velocidad en cada prueba.

El contacto eléctrico será mediante una escobilla de carbón maquinada para hacer un buen contacto con el diámetro del latón ubicado en el eje de rotación.

Las probetas fueron acopladas en un cilindro de PVC el cual facilita su ensamble al eje vertical. Este a su vez acoplado a un motor eléctrico proveedor de la potencia de rotación a las probetas. Este acoplamiento permitirá un aislamiento del electrodo al sistema eléctrico del motor. Se implementaran una serie de placas deflectoras en el contenedor para evitar el vortex en las probetas además de evitar el asentamiento de las partículas en fondo del recipiente. El sistema de agitador mostrado en la Figura 3.4, fue desarrollado para el estudio de EC.

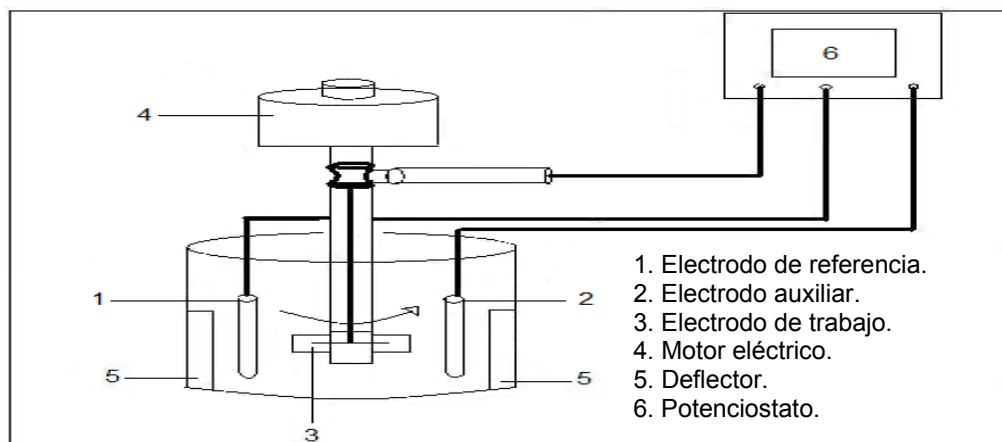


Figura 3.4. Diagrama esquemático del sistema de electrodo rotatorio.

La probeta tiene un área de exposición de 12 cm² y antes de cada medición, la superficie de cada probeta fue pulida con lija de papel No. 180 y 220, y finalmente limpiadas con alcohol y agua desionizada (Figura 3.5).



Figura 3.5. Mediciones de probetas.

La solución usada para la prueba fue agua de la red y fue utilizada arena sílice para el estudio de la influencia de las partículas sólidas en suspensión. Las partículas que se usaron fueron de un diámetro promedio de 74 µm (malla # 200) y 149 µm (malla # 100), y fueron añadidas al agua después de ser lavada, secada y pesada (Figura 3.6).



Figura 3.6 Medición y tratamiento de arena erosiva.

El agitador consiste de un contenedor de plástico PVC con un volumen de 5 litros, un motor eléctrico STIR-PAK™ modelo 4554 con rango de velocidad de 0 a 2000 RPM, un eje de acero inoxidable el cual guía el alambre conector del potencióstato a la probeta. Además de un portador de PVC para el acoplamiento de las probetas y 4 placas deflectoras ubicadas cerca de las paredes del contenedor (Figura 3.7).

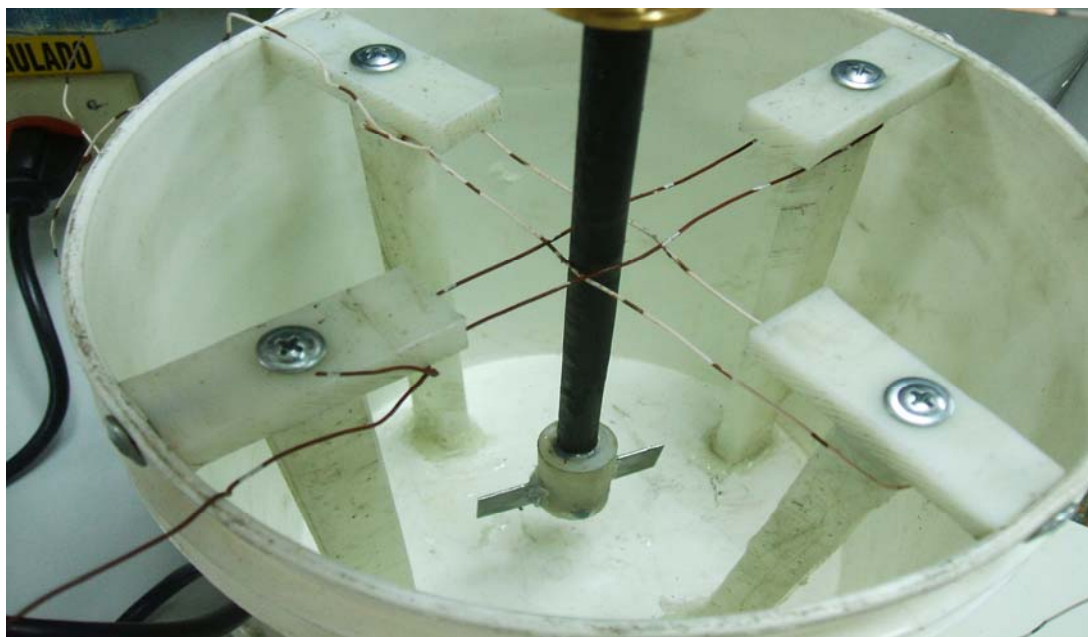


Figura 3.7 Dispositivo de rotación de probeta.

La conexión del electrodo de trabajo hacia el sistema potencióstato fue aislada del eje de rotación con un termoplástico. La conexión del alambre de cobre fue soldada desde el electrodo de trabajo a el disco de latón en la parte superior, está a su vez estuvo en contacto a una escobilla de carbón para dar un buen contacto eléctrico (Figura 3.8).



Figura 3.8 Conexión del electrodo de trabajo con el potenciostato.

La celda electroquímica está constituida de 3 electrodos: electrodo de trabajo, que es la probeta de acero al carbono localizada al final del eje de rotación aislada para evitar corrientes parásitas, electrodo de referencia Ag/AgCl situado en uno de los deflectores de igual manera el electrodo auxiliar de grafito para evitar daños por partículas a causa del flujo turbulento (Figura 3.9).

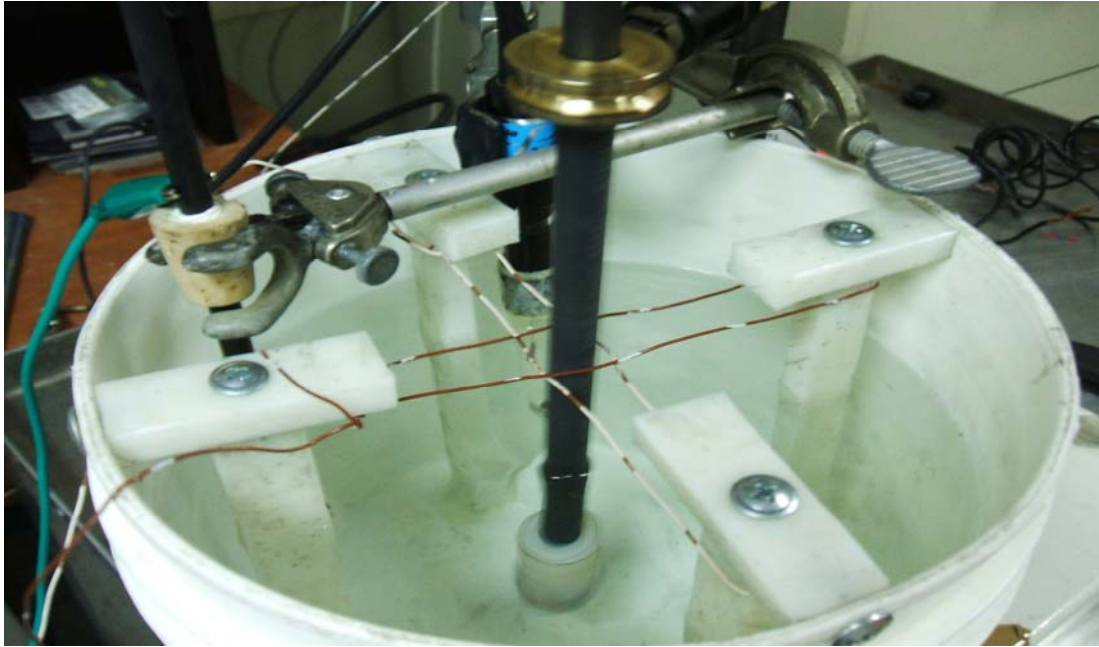


Figura 3.9 Celda electroquímica con electrodo rotatorio.

3.9 Dispositivos para medir erosión-corrosión.

Construcción de un electrodo de cilindro rotatorio. Un RCE es necesario que gire a velocidades altas y bajas y que sea dentro de un rango amplio y de manera continua (Tabla 3.4). Además, se debe poder medir la velocidad y mantenerla constante. El diseño de los rodamientos es importante para asegurar una rotación suave y eliminar excentricidades y cabeceos. El suministro de energía eléctrica al electrodo debe ser con un mínimo de resistencia. El diseño de la celda es usualmente manejada por consideraciones eléctricas y electroquímicas en lugar de la dinámica de los fluidos. La geometría del cilindro es definida en términos de la relación longitud/diámetro. La velocidad de rotación se mide con un tacómetro. La energía puede ser suministrada por medio de escobillas metálicas, aunque a altas velocidades continuas puede producir fatiga en el metal.

Tabla 3.4 Dispositivos de medición de erosión-corrosión

Tipos	Principios	Ambientes	Bibliografía
Erosion-corrosion unit	Impacto de chorro	Lodo (slurry)	17
Erosion-corrosion tester	Rotación abrasiva sobre la probeta	Lodo (slurry)	17
Impingement jet of slurry	Impacto de chorro	aceite-arena-lodo	21
RCE	Electrode cilíndrico rotatorio	agua, lodo (slurry)	16
Chorro	Impacto de chorro	agua, lodo (slurry)	18

Aplicaciones del electrodo de cilindro rotatorio. Es utilizado en el estudio de transferencia de masa en la deposición catódica del cobre, en el desarrollo de procesos de electrodeposición a altas velocidades. Una aplicación que será de importancia en el futuro es la electrorrecuperación de metales de aguas residuales. Corrosión y Disolución. Muchos de los primeros trabajos del Rotating electrode cylinder (RCE) fueron hechos estudiando reacciones de corrosión. El RCE se utiliza en investigaciones de los efectos del oxígeno y cloruros disueltos, en la velocidad de corrosión y eficacia de los inhibidores en el control de corrosión. Recientemente, el RCE se ha utilizado para estudiar el transporte de masa en metales líquidos y sales fundidas.

CAPITULO 4 RESULTADOS Y DISCUSION

4.1 Resultados gravimétricos.

Después de simular el agitador con régimen de flujo turbulento a dos diferentes velocidades y en un período de trabajo de 10 horas, se obtuvieron pérdidas de peso, en las probetas de acero al carbono (Tabla 4.1). La pérdida de peso en las probetas 1 y 2 fue inducida por la activación del acero al carbón y con la velocidad de rotación trabajada. Claramente se observa que al incorporar la arena gruesa, se incrementa la pérdida de peso por la interacción de la probeta con las partículas. Además, hay una diferencia de pérdida de peso con las dos velocidades de rotación. En la interacción de arena fina, se observa una reducción en la pérdida de peso por la diferencia del diámetro de las partículas.

Tabla 4.1 Medición de erosión-corrosión.

Probeta	Ambiente/Velocidad de rotación (rpm)	Pérdida de peso, mg	Velocidad de corrosión	
			mdd*	mm/y*
1	Agua, 350 (rpm)	29	547	2.74
2	Agua, 550 (rpm)	25.4	488	2.44
3	Agua con 10% de arena gruesa (149 μ m), 350 (rpm)	36.6	703	3.51
4	Agua con 10% de arena gruesa (149 μ m), 550 (rpm)	42.4	814	4.07
5	Agua con 10% de arena fina (74 μ m), 350 (rpm)	32.4	622	3.11
6	Agua con 10% de arena fina (74 μ m), 550 (rpm)	32.5	624	3.12

mdd = mgs/dm². día, mm/y* = velocidad de corrosión, mm/año.

4.2 Resultados electroquímicos.

Se presentan dos tipos de resultados, para corroborar el fenómeno de la corrosión presente en este tipo de procesos influenciados por efectos mecánicos.

Curvas de polarización. De las Figura 4.1 a la Figura 4.5 se muestra el comportamiento del acero al carbono ensayado en diferentes soluciones de agua y agua-arena (10%), indicando que se corroe. Como se puede observar en la Figura 4.1 a medida que la polarización electroquímica incrementa, la actividad de la superficie del acero, muestra un aumento en la velocidad de corrosión. La tendencia de desplazamiento de la curva anódica (parte superior) demuestra una corrosión más activa.

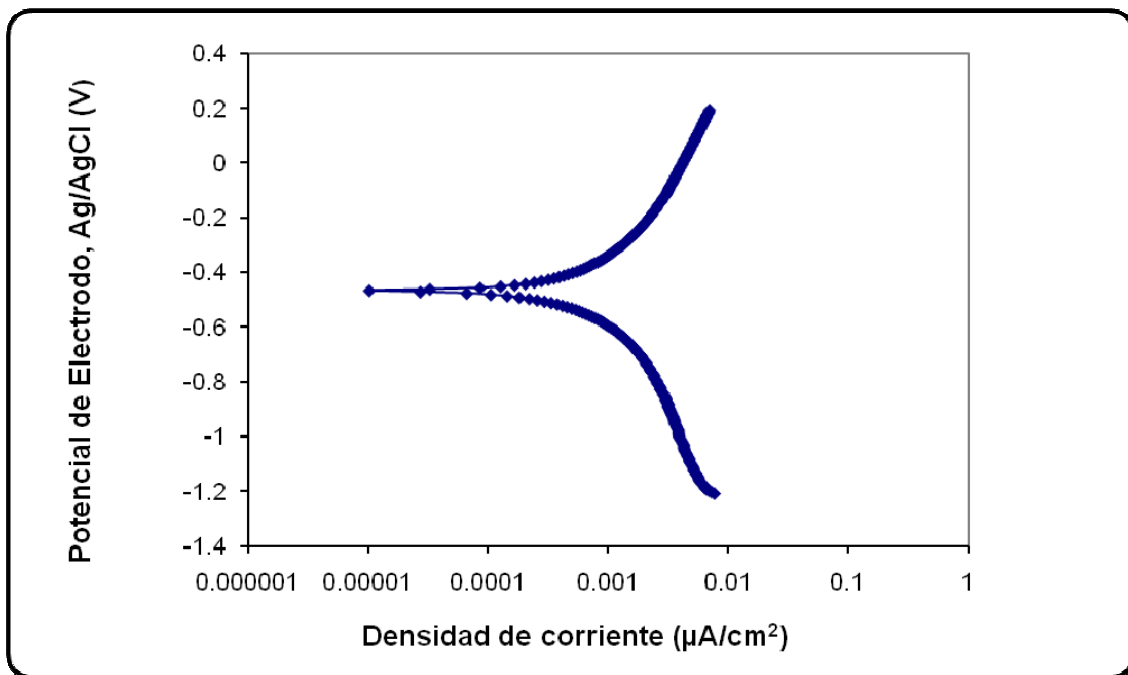


Figura 4.1 Curva de polarización del acero en agua 2 horas inmersión.

En la Figura 4.2 el potencial de corrosión se desplaza de valores más positivos a los del agua, hacia valores más negativos en el lodo (slurry) conforme el tiempo de exposición avanza a 4 horas. De igual forma la curva correspondiente al comportamiento anódico (parte superior) en el rango de potenciales positivos indicando un proceso de corrosión más activo. Se observa un incremento considerable al interactuar con las partículas en suspensión. Esto debido a los impactos que ocurren sobre la superficie del acero, removiendo la capa protectora de óxido a causa de la abrasión.

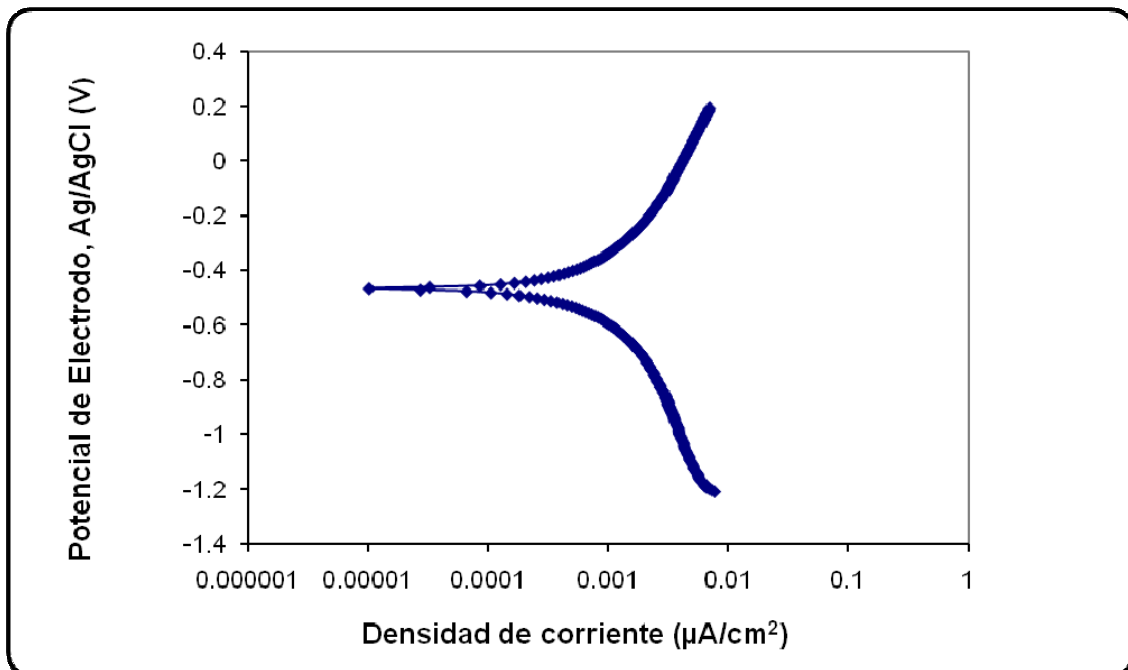


Figura 4.2 Curva de polarización del acero en agua y arena 4 horas inmersión.

En la Figura 4.3 muestra que a medida que el tiempo avanza a 6 horas de inmersión en el lodo (slurry), la polarización electroquímica sigue incrementándose, aumentando la velocidad de corrosión. Esto es debido al fenómeno de erosión-corrosión presente en las partículas en movimiento, provocando un efecto abrasivo en la superficie. Además el potencial de corrosión sigue desplazándose de valores más positivos hacia valores más negativos. La tendencia de las curvas a la derecha muestra un incremento en la corriente que circula por la celda electroquímica, incrementando la velocidad de corrosión.

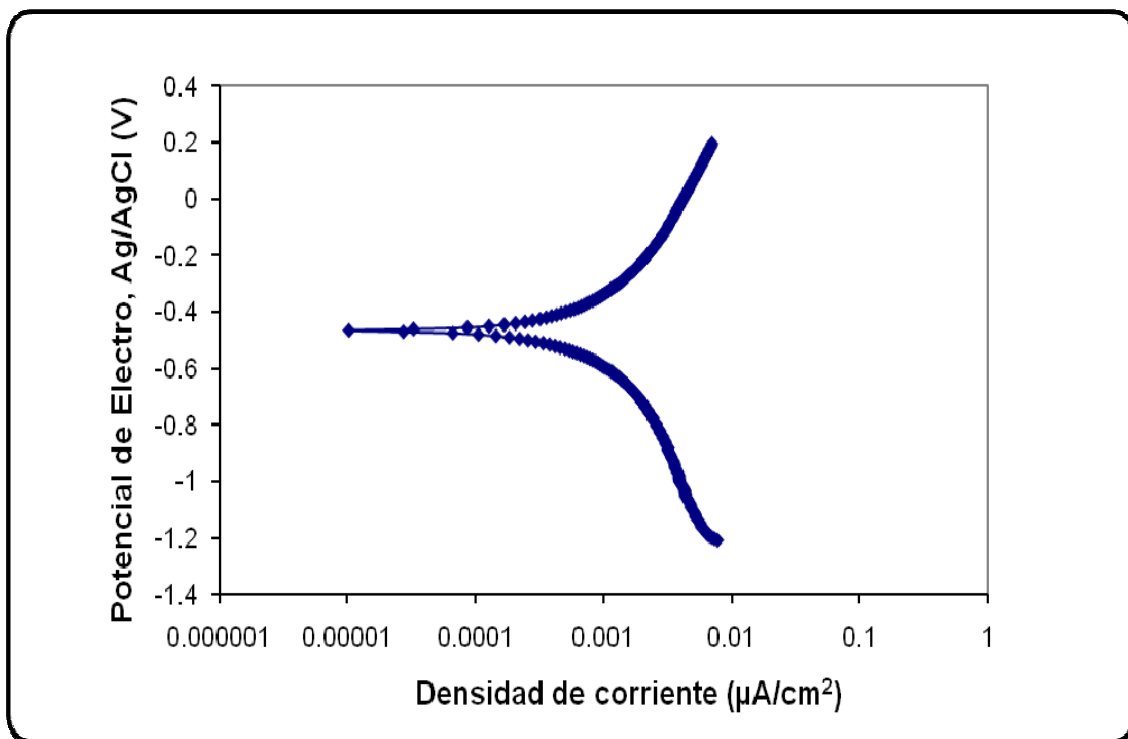


Figura 4.3 Curva de polarización del acero en agua y arena 6 horas inmersión.

En la Figura 4.4 la polarización electroquímica sigue incrementa y su vez aumenta la velocidad de corrosión. El potencial de corrosión muestra valores más negativos por la exposición en el lodo (slurry) conforme a un tiempo inmersión de 8 horas. Esto debido a la abrasión ejercida por las partículas en suspensión, que a su vez remueven la película de óxidos de la superficie acelerando el proceso de corrosión.

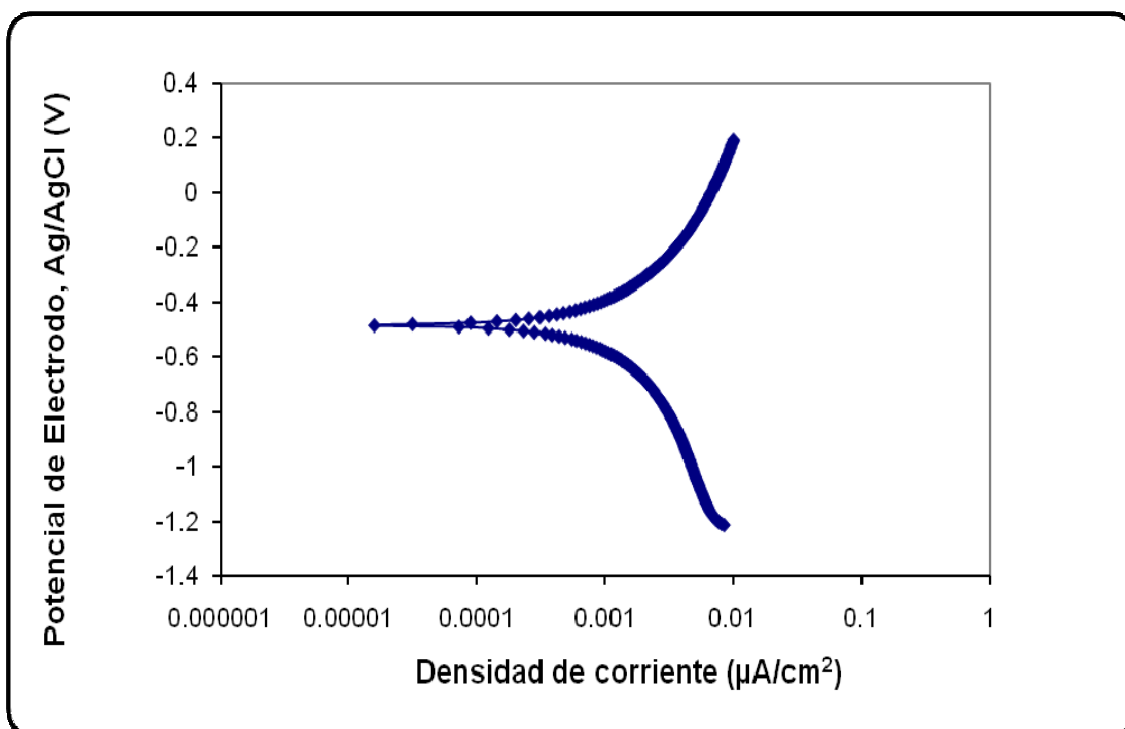


Figura 4.4 Curva de polarización del acero en agua y arena 8 horas inmersión.

En la Figura 4.5 se observa la comparación de las curvas de polarización desde el ensayo en agua a agua y sólidos. Como se puede observar a medida que la polarización electroquímica incrementa, la actividad de la superficie del acero, muestra un aumento en la velocidad de corrosión. El potencial de corrosión se desplaza de valores más positivos en el agua, hacia valores más negativos en el lodo (slurry) conforme el tiempo de exposición avanza. En las curvas

correspondientes al comportamiento anódico (parte superior) en el rango de potenciales positivos indicando un proceso de corrosión más activo.

El desplazamiento de dichas curvas hacia la derecha nos indica que existe un incremento en la corriente que circula por la celda electroquímica, y entonces tenemos una mayor velocidad de corrosión. La forma de las curvas indica que en ninguno de los casos se ha formado alguna película de productos de corrosión, ya que estos son removidos por el efecto abrasivo del lodo (slurry).

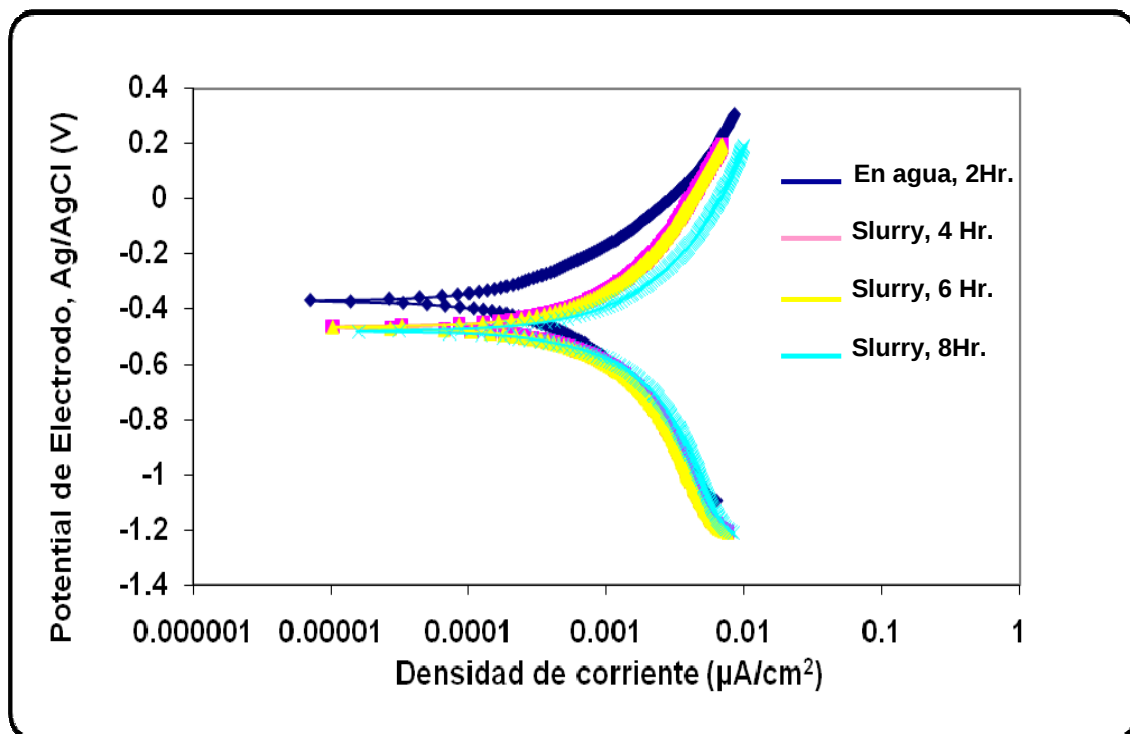


Figura 4.5. Comparación de Curvas de polarización del acero a través del tiempo en inmersión.

4.3 Evaluación de superficies de probetas metálicas.

La superficie del acero al carbono comercial, después de ser expuesto a 10 h de ensayo, en corrosión en agua y flujo turbulento (Figuras 4.6 y 4.7) se observa un claro efecto de la corrosión del acero debido a su actividad. En la superficie se puede observar que el efecto de la turbulencia deja un rastro claro del patrón del flujo a causa de efecto corrosivo del ambiente.



Figura 4.6 Evaluación de la superficie del acero en agua. Se aprecia el patrón corrosivo sobre la superficie a una velocidad de rotación de 350 (RPM).



Figura 4.7 Evaluación de la superficie del acero en agua. Se observa un mayor impacto en el patrón corrosivo por la velocidad de rotación de 550 (RPM).

En el ensayo de las probetas de acero al carbón en agua y sólidos en suspensión (Figuras 4.8 y 4.9), las partículas de arena gruesa de diámetro ($74\text{ }\mu\text{m}$) dejan un patrón de rugosidad sobre la superficie, con extensivas ranuras, visibles hoyos o porosidades a causa de la erosión-corrosión. Estos factores remueven los residuos de óxidos sobre la superficie acelerando el proceso de corrosión.

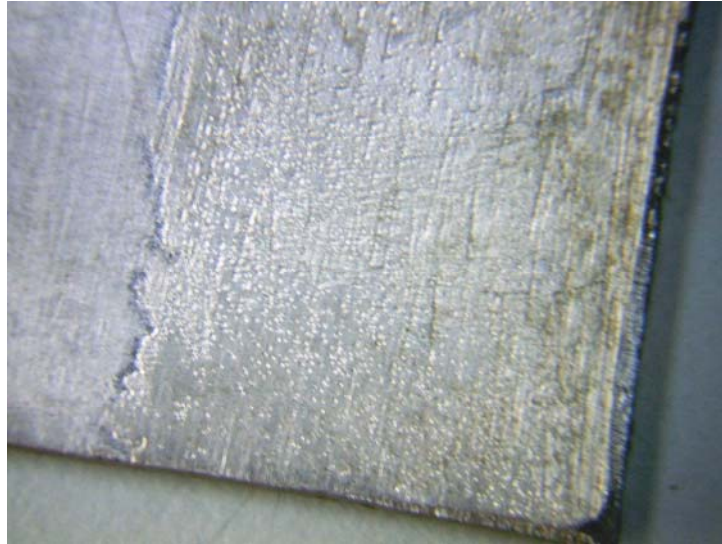


Figura 4.8 Evaluación de la superficie del acero en agua y sólidos ($149\text{ }\mu\text{m}$), velocidad de rotación 350 (RPM). Se observa un patrón erosivo por el tamaño de grano, ranuras y perforaciones.



Figura 4.9 Evaluación de la superficie del acero en agua y sólidos ($149\text{ }\mu\text{m}$), velocidad de rotación 550 (RPM). Se aprecia que con el cambio de velocidad incrementan los impactos.

En las probetas ensayadas en agua y sólidos en movimiento arena fina (Figuras 4.10 y 4.11), el impacto de la erosión fue menor a causa de la dureza y diámetro de las partículas (149 μm). Además la distribución de las partículas en suspensión que impactaron sobre la superficie fueron más uniformes, provocando una rugosidad ligera, ranuras y perforación de menor impacto a los ensayos con arena gruesa.

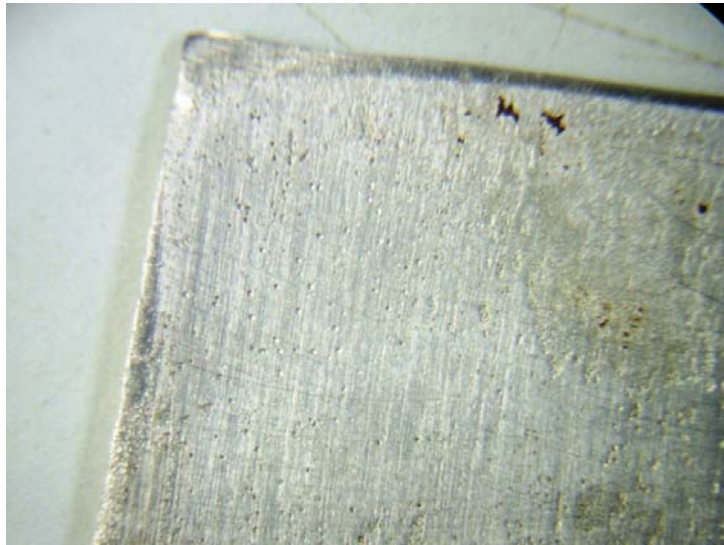


Figura 4.10 Evaluación de la superficie del acero en agua y sólidos (74 μm), velocidad de rotación 350 (RPM). Se observa una erosión de menor impacto sobre superficie.

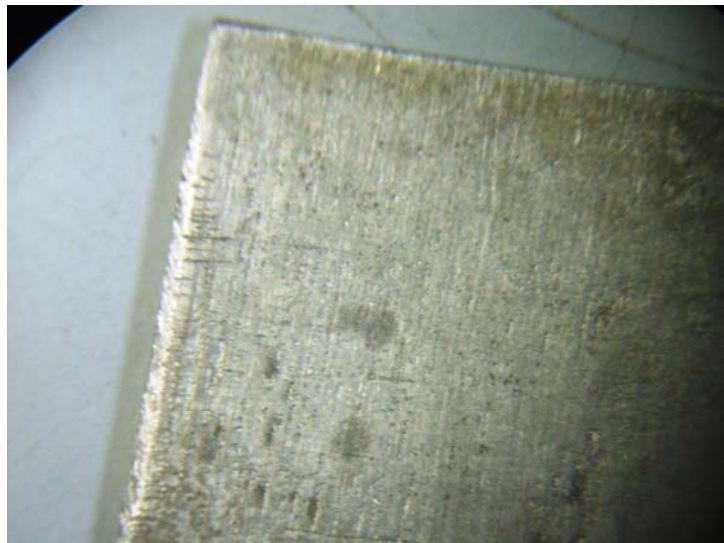


Figura 4.11 Evaluación de la superficie del acero en agua y sólidos (74 μm), velocidad de rotación 550 (RPM). Se aprecia que se incrementa el impacto debido a la velocidad.

CONCLUSIONES

La evaluación del fenómeno erosión-corrosión se llevó a cabo para demostrar el impacto en acero al carbón a causa del deterioro mecánico y corrosivo. Las probetas fueron expuestas a una combinación electroquímica, pérdida de peso y visual por lo que se cuantificaron tres formas básicas de deterioro; corrosivo, erosivo y la condición erosión-corrosión. Se logró construir un dispositivo dinámico en el cual se adaptó una celda electroquímica. Así se realizaron los ensayos de erosión-corrosión sobre el acero al carbón y las pruebas realizadas fueron satisfactorias. Los resultados obtenidos de pérdidas de pesos son muy exactos demostrando que la interacción de erosión-corrosión en presencia de sólidos en suspensión, muestra un incremento de pérdidas al haber trabajado con partículas de arena fina al de la arena gruesa. La construcción de la celda electroquímica fue exitosa, con los ensayos de polarización se obtuvieron resultados de corrosión. Y además al analizar las curvas anódicas se comprobó la actividad del acero al contacto con el ambiente expuesto. La actividad del acero se fue incrementando a un mayor tiempo de trabajo en condiciones de flujo turbulento y temperatura ambiente. El efecto abrasivo de las partículas en suspensión es complejo, dependiendo de la magnitud del desgaste de la superficie de las probetas por la remoción del óxido formado en la superficie del acero.

BIBLIOGRAFIA

1. Baki Karamis M.. Tribology a thigh-velocity impact.M. Vol. 40, No. 1, pp. 98-104 January 2007.
2. Burstein G. T, Sasaki K. . Effect of impact angle on the slurry erosion-corrosion of 304L stainless steel. Vol. 240, pp 80-94, 2 February 2000.
3. Duan C.G., Karelin V.Y.. Abrasive erosion and corrosion of hydraulic machinery. Vol.2, Imperial college press, 2002.
4. Hawthorne H. M.. Some Coriolis slurry erosion test developments. Vol.35, No. 10, pp 625-630. October 2002.
5. Koch Gerhardus H., Brongers Michiel P.H.,Thompson Neil G., Virmani Y. Paul and Payer J.H. Corrosion costs and preventive strategies in the United States. www.nace.or .
6. Mars G. Fontana. McGraw-Hill. Corrosion Engineering. Inc. 1986.
7. McDougall B.A.B. and Neville A. Tribo-corrosion of Ti and its alloys. Vol. 42, No. 12, pp 46-50, December 2003.
8. Meas Vong Yunny, Lopez Gonzalez Walter, Rodriguez Lopez Patricia, Avila Mendoza Javier y Genesca Llogueras Joan. Tres métodos para evaluar una velocidad de corrosión. Enero-abril, 1991.
9. Michael Schorr, Bejamin Valdez, and Juan de Dios Ocampo. Erosion-corrosion in industrial steam turbines, Universidad Autonoma de Baja California, Mexico., Vol. 48, pp. 62-65, 2009.
10. Nesic S, Bienkowski J., Bremhorst K., and Yang K.S. Testing for Erosion-Corrosion under disturbed flow conditions using a rotating cylinder with a stepped surface. Vol. 56, No. 10, October 2000.
11. Neville A., Hodgkiess T., Dallas J.T. A study of erosion-corrosion behavior of engineering steels for marine pumping applications. Vol. 186-187, pp.497-507, 1995.
12. Neville A., Reyes M. and Xu H., Examining corrosion effects and corrosion/erosion interactions on metallic material in aqueous slurries. Vol. 35, No.10 pages. 615-689, October 2002.

13. Orozco Ocaña David. Valdez Salas Benjamín. Ensayos para evaluar el efecto del flujo sobre algunos inhibidores de corrosión en medio ácido sobre acero 1018. Junio de 1993.
14. R. Roberge Pierre. Corrosion Engineering Principles and Practice. McGraw-Hill, Inc. 2008.
15. R. Roberge Pierre. Handbook of Corrosion Engineering. McGraw-Hill, Inc. 2000.
16. Rubalcaba Murillo Eduardo. Valdez Salas Benjamín. Construcción de un electrodo de cilindro rotatorio para la caracterización de inhibidores de corrosión. Octubre 1992.
17. Schorr Michael, Weintraub Erica and David Andrasi. Erosion-Corrosion Measuring Devices. "Corrosion Testing and Evaluation: Silver Anniversary Volume, ASTM STP 1000, Philadelphia, 1990, pp151-159.
18. Tang. X., Xu L.Y., Cheng Y.F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil-sand slurry. II: Synergism of erosion and corrosion. Corrosion Science. January, 2008.
19. Tian B.R. and Cheng Y.F. Electrochemical corrosion behavior of X-65 steel in the simulated oil-sand slurry. I Effects of hydrodynamics condition. January, 2008.
20. Woo Park Young, Sankara Narayanan T.S.N. and Yong Lee Kang. Fretting corrosion of tin-plated contacts: Evaluation of surface characteristics. Vol. 40, No. 3, pp 548-559, March 2007.
21. Zu. J. B., Hutchings I. M. and Burstein G. T. Design of slurry erosion test rig. Department of Materials Science and Metallurgy, University of Cambridge., Vol. 140, pp. 331-344, 1990.