



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

**INSTITUTO DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
ÁREA ACADÉMICA EN MATERIALES Y METALURGIA**

***“Virtualización de la Asignatura de
Corrosión y Degradación de materiales”***

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO
DE INGENIERO EN CIENCIA DE
LOS MATERIALES**

**P R E S E N T A :
ISRAEL NAVARRETE RAMIREZ.**

Director: Dr. VICTOR ESTEBAN REYES CRUZ.

Pachuca de Soto, Hidalgo; México.

RESUMEN.

La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, a través de la Universidad Virtual, se ha fijado como objetivo, dentro de su modelo de calidad educativa, la incorporación de nuevas estrategias de enseñanza centradas en el estudiante; mediante el diseño de paquetes didácticos, apoyados en el uso de nuevas tecnologías (Internet) para atender la demanda de los especialistas que comprendan las tecnologías más recientes y sean capaces de manejar sistemas cada vez más complejos. La UAEH tiene que ser capaz de responder a esta demanda, adaptando la formación de los estudiantes a las necesidades de la sociedad.

Para la elaboración de este trabajo primeramente fue necesario tomar los cursos de: Introducción a la Plataforma Blackboard System Learning, Taller de Diseño de Materiales para E-Learning y el Taller de Diseños de Cursos en Línea. Posteriormente, mediante investigación bibliográfica, utilización de material didáctico base, enriquecimiento mediante el uso de imágenes, prácticas de laboratorio y las propias herramientas que se ofrecen en la plataforma, se desarrollaron las introducciones, objetivos, mapas conceptuales, contenidos y presentaciones en PowerPoint; para cada unidad didáctica de la Asignatura de Corrosión y Degradación que se imparte en la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de los Materiales.

Este trabajo será material de apoyo para estudiantes de dicha asignatura y está basado en la creación de actividades de aprendizaje utilizando las nuevas tecnologías de la información y comunicación. Así mismo, este trabajo será una herramienta más para el catedrático que imparta la materia de **Corrosión y Degradación**. Por otra parte, este material se podrá ir actualizando de acuerdo a las necesidades, al igual que se podrá ir complementando para que en planes futuros se pueda contar con un curso completamente no presencial.

Este material será utilizado por alumnos de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, de la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de los Materiales, que se encuentren inscritos en la asignatura. Su uso será vía Internet a través de la página de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en su liga con el Campus Virtual de esta institución.

INDICE	<i>Pág.</i>
LISTA DE FIGURAS.	i
LISTA DE TABLAS.	ii
INTRODUCCIÓN.	1
CAPITULO I. METODOLOGÍA GENERAL PARA EL DISEÑO DEL PAQUETE DIDÁCTICO.	
1.1 Elaboración de formatos.	3
1.2 Elaboración de mapas conceptuales.	4
1.3 Elaboración de guías didácticas.	5
1.3.1 Introducción.	6
1.3.2 Objetivos.	7
1.3.3 Orientaciones para el estudio.	8
1.3.4 Estructuras temáticas.	9
1.3.5 Desarrollo de contenidos.	10
1.4 Elaboración de presentaciones.	10
Elaboración de presentaciones en Power- Point® de cada unidad	11
1.5 Elaboración de material auxiliar	
Edición de imágenes y trabajos de congreso de la SMEQ	11
CAPITULO II. PAQUETE DIDÁCTICO DE LA ASIGNATURA DE CORROSIÓN Y DEGRADACIÓN.	
2.1 Formatos de información.	12
Información del profesor. Formato 01	13
Información del curso. Formato 02	16
Planeación de contenidos. Formato 03	20
Guía de estudio. Formato 04.	25
Acuerdo de academia. Formato 5	30
2.2 Mapas conceptuales.	
Mapa conceptual general de la asignatura	31
Mapa conceptual de la Unidad I.	31
Mapa conceptual de la Unidad II.	32
Mapa conceptual de la Unidad III.	32
Mapa conceptual de la Unidad IV.	33
Mapa conceptual de la Unidad V.	33

2.3 Contenidos de las unidades didácticas de la asignatura de corrosión y degradación.	34
UNIDAD I. INTRODUCCIÓN A LA CORROSIÓN	
1.1 Introducción.	35
1.2 Objetivos.	35
1.3 Orientación para el estudio.	35
1.4 Estructura temática.	36
1.5 Desarrollo de contenidos.	36
1.5.1 Definición.	36
1.5.2 Ingeniería de corrosión.	37
1.5.3 Medio ambiente.	37
1.5.4 Costos ocasionados por la corrosión.	38
1.5.5 Daños por corrosión.	40
1.5.6 Referencias.	40
UNIDAD II. FUNDAMENTOS ELECTROQUÍMICOS	
2.1 Introducción.	41
2.2 Objetivos.	41
2.3 Orientación para el estudio.	41
2.4 Estructura temática.	41
2.5 Desarrollo de contenidos.	42
2.5.1 Reacciones electroquímicas de oxidación.	42
2.5.2 Formación de celda.	44
2.5.3 Electrodo mixto.	52
2.5.4 Polarización.	53
2.5.5 Pasivación.	61
2.5.6 Crecimiento de la capa de óxido	63
2.5.7 Efecto del oxígeno, temperatura y concentración sobre la velocidad de corrosión	64
2.5.8 Referencias.	67
UNIDAD III. FORMAS DE CORROSIÓN	
3.1 Introducción.	68
3.2 Objetivos.	68
3.3 Orientación para el estudio.	68
3.4 Estructura temática.	68
3.5 Desarrollo de contenidos.	69
3.5.1 Clasificación de la corrosión.	69
3.5.2 Corrosión uniforme	70
3.5.3 Corrosión galvánica.	70
3.5.4 Corrosión por erosión.	73
3.5.5 Corrosión por socavados.	75
3.5.6 Corrosión por picaduras.	76
3.5.7 Corrosión selectiva.	77
3.5.8 Corrosión ínter granular.	77
3.5.9 Corrosión por tensión.	78
3.5.10 Corrosión por fragilización de hidrógeno.	80
3.5.11 Corrosión microbiológica.	81
3.5.12 Referencias.	84

UNIDAD IV. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN	
4.1 Introducción.	86
4.2 Objetivos.	86
4.3 Orientación para el estudio.	86
4.4 Estructura temática.	86
4.5 Desarrollo de contenidos.	87
4.5.1 Unidades de la velocidad de corrosión	87
4.5.2 Diagramas de Pourbaix.	88
4.5.3 Curvas de polarización.	92
4.5.4 Diagramas de Evans.	95
4.5.5 Medidas de impedancia.	96
4.5.6 Resistencia a la polarización.	98
4.5.7 Pruebas de corrosión.	98
4.5.8 Medición de la corrosión en plantas de proceso	101
4.5.9 Referencias.	116
UNIDAD V. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN	
5.1 Introducción.	117
5.2 Objetivos.	117
5.3 Orientación para el estudio.	117
5.4 Estructura temática.	117
5.5 Desarrollo de contenidos.	118
5.5.1 Revestimiento orgánico e inorgánico.	118
5.5.2 Protección metálica.	122
5.5.3 Inhibidores de corrosión.	125
5.5.4 Protección catódica.	126
5.5.5 Protección anódica.	130
5.5.6 Referencias.	130
2.4 Presentaciones en Power-Point®.	131
Presentación de la Unidad I.	132
Presentación de la Unidad II.	137
Presentación de la Unidad III.	146
Presentación de la Unidad IV.	153
Presentación de la Unidad V.	157
2.5 Material auxiliar.	164
Edición de imágenes y Trabajos de congreso de la SMEQ	
CONCLUSIONES.	165
BIBLIOGRAFÍA GENERAL.	167

LISTA DE FIGURAS.

Figura No.	Nombre	Pág.
1	Ejemplo de un mapa conceptual.	4
2	Esquema de estructuras de Unidades Didácticas.	5
3	Esquema de organización de la introducción.	6
4	Celda electroquímica.	44
5	Medición del potencial de electrodo.	49
6	Ejemplo de polarización.	54
7	Polarización.	55
8	Relación seno hiperbólico del sobrepotencial Vs. logaritmo de la corriente.	56
9	Diagramas de Evans.	56
10	Cinética de un proceso de corrosión.	57
11	Diagrama de Evans del equilibrio Zn/Zn^{2+}	57
12	Diagrama de Evans de dos reacciones.	59
13	Proceso controlado por la Polarización por Activación.	60
14	Proceso controlado por la Polarización por Concentración.	61
15	Características de corrosión de un metal activo - pasivo en Función del poder oxidante de la solución.	61
16	Formación de capa pasiva.	62
17	Ejemplos Pasivación.	62
18	Formación de capa de óxido.	63
19	Gráfica de Velocidad de Corrosión Vs. Agente Oxidante.	64
20	Gráfica de Velocidad de Corrosión Vs. Efecto de la velocidad de la solución.	65
21	Gráfica de Velocidad de Corrosión Vs. Temperatura.	65
22	Corrosión de aceros en crudo contenidos en azufre.	66
23	Gráfica de Velocidad de Corrosión Vs. Productos del proceso de corrosión.	66
24	Corrosión uniforme.	70
25	Corrosión galvánica.	72
26	Deterioro de material ocasionado por la corrosión por erosión.	74
27	Corrosión por socavados, la cual se aprecia en las cuerdas de los tornillos y alrededor de los barrenos de la pieza metálica.	75

28	Corrosión por picadura en una superficie plana y alrededor de una tubería.	76
29	Corrosión íntergranular. Desprendimiento de granos.	78
30	Falla ocasionada por corrosión por tensión.	79
31	Falla de un material por la corrosión por fatiga.	80
32	Corrosión por evolución de hidrógeno.	81
33	Diagrama tipo Pourbaix.	92
34	Curvas de Polarización Potenciodinámica.	93
35	Curvas de Polarización Potenciostática.	94
36	Curvas de Polarización Galvanostática.	94
37	Metodología para extraer las pendientes de Tafel, el potencial de corrosión y la corriente de corrosión, gráficamente	95
38	Esquematización de la perturbación utilizada en la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.	96
39	Diagramas de Bode para representar los resultados experimentales: a) Módulo; b) Ángulo de fase.	97
40	Ejemplo del Ajuste de los resultados experimentales a un semicírculo.	97
41	Metodología para extraer la Resistencia de Polarización gráficamente.	98
42	Método NACE TM para la evaluación de la corrosión. a) Equipo utilizado para la prueba de herrumbre, b) Testigos de corrosión.	99
43	Método de la Rueda dinámica: a) Disposición de los testigos de corrosión en botellas que contienen el medio corrosivo, b) Equipo utilizado y c) Testigos de corrosión.	99
44	Resistencia eléctrica: a) Probeta corrosimétrica, b) Equipo de medición y c) Disposición de las probetas corrosimétricas en la industria.	100
45	Esquema de protección Catódica en una tubería.	127
46	Esquema de protección de una tubería con ánodo de sacrificio..	127
47	Protección Catódica.	128
48	Control de potencial en la región pasiva para protección anódica.....	129
49	Equipo esquemático para la protección anódica de un tanque de almacenamiento.	129

LISTA DE TABLAS,

Tabla No.	Nombre	Pág.
1	Estudios de costos de la corrosión de 1949 a 1979 de 9 países.	38
2	Ejemplo de ahorro estimado en el tratamiento químico por incorporación de un nuevo inhibidor en una planta hidrosulfuradora.	39
3	Potenciales de electrodos estándar a 25 °C, 1atm de presión.	51
4	Series estándares de FEM y series galvánicas de algunos metales comerciales y aleaciones en agua de mar.	51
5	Serie galvánica en agua de mar, de algunos materiales metálicos comerciales.	71
6	Tipos de Corrosión.	83
7	Resistencia de la corrosión relativa.	88
8	Estudio de especiación de cobre en medio de cianuros. [CN]=0.6M, [Cu(I)]=0.1M y [Cu(II)].	90
9	Datos para realizar diagrama de Zonas de Predominio del Cu(I)-CN.	90
10	Datos para realizar diagrama de Existencia Predominio para Cu(I) pCN'=0.222.	90
11	Datos para realizar diagrama de Zonas de Predominio del Cu(II)-CN.	91
12	Datos para realizar diagrama de Existencia Predominio para Cu(II) pCN'=0.222.	91
13	Datos para realizar diagrama de Pourbaix pCN'=0.222 y pCu'=1.	91
14	Procedimientos de trabajo.	101
15	Protección anódica de aleaciones en diferentes soluciones.	130
16	Materiales de los cátodos para la protección anódica.	130

INTRODUCCIÓN.

En el mundo actual es evidente la importancia del conocimiento para el desarrollo de las naciones. La educación, es reconocida como medio fundamental para el desarrollo sostenible de las mismas; por ello es que las instituciones educativas se encuentran inmersas en un proceso continuo de redefinición, en donde lo más importante es identificar los roles que deben tener tanto el maestro como el alumno dentro su modelo educativo.

La incorporación de las tecnologías a la educación siempre ha impactado. Con la invención de la imprenta, se elaboraron materiales gráficos y libros de texto. Gracias a la radio y a la televisión se ha logrado llevar educación a comunidades donde antes era imposible hacerlo (Edusat, Telésecundarias, Telébachillerato, etc.). Ahora con Internet se acercan lugares, eventos, personas, métodos, información, conocimientos y descubrimientos.

El Internet se ha convertido en una opción educativa que complementa y ayuda al docente, quien debe asumir el papel de facilitador, mediador, orientador y gestor del proceso de aprendizaje. Esto es, el Internet se ha adoptado como parte de la metodología; con diferentes fines que van desde la distribución de la información y uso de sus herramientas de comunicación como complemento de la enseñanza presencial, hasta constituirse en una importante herramienta para la creación y distribución de cursos en línea.

México vive hoy en día un modelo de modernización, es por ello que actualmente la Secretaría de Educación Pública (SEP) está apoyando fuertemente a las instituciones de educación superior, mediante el planteamiento de estrategias que les permitan obtener egresados con un mejor aprovechamiento académico.

Ante lo expuesto en los párrafos anteriores, se puede ver la importancia de realizar la digitalización de las materias que se imparten en la Licenciatura en Ingeniería de Ciencias de los Materiales, que conlleven a la excelencia y a la vanguardia de la carrera antes mencionada. Por esta razón, en este trabajo se elabora material de apoyo basado en la creación de actividades de aprendizaje utilizando las nuevas tecnologías de la información y comunicación (entorno virtual); en este caso para la asignatura de Corrosión y Degradación, de la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de los Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Con el fin de que la educación en nuestra casa magna de estudios se siga posicionando entre los primeros niveles académicos del estado y del país.

En el entorno virtual o plataforma tecnológica, se pone al alcance del alumno el material de la clase, resúmenes documentados de las unidades de aprendizaje, trabajos en grupo, ejercicios de auto evaluación, evaluaciones y herramientas de comunicación para contactar al profesor como son: el correo electrónico, el foro de debate, el Chat y la pizarra electrónica, aunque estas no se consideren importantes pues existe el contacto cara a cara. En ella, se publican programas, horarios e información relacionada al curso y se promueve la comunicación fuera de los límites áulicos entre los alumnos y el docente. También se dispone de una herramienta para realizar un seguimiento con relación al uso que hace el alumno del material y herramientas que tiene a su disposición.

Este material cubre el programa de la asignatura de Corrosión y Degradación, que la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo autoriza al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, para la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de los Materiales.

La importancia de este material radica en manejar otros métodos de investigación y de impartición de cátedra para que aumente el aprovechamiento de los alumnos. Cada unidad cuenta con introducción, un objetivo en específico, orientaciones para su estudio, estructura de la unidad y el desarrollo de los contenidos didácticos. En las dos primeras Unidades el alumno alcanzará un nivel de comprensión del fenómeno de la Corrosión y Degradación de Materiales; además de que le permitirá aplicar estos conceptos en las Unidades III, IV y V. Mediante el conocimiento de la Unidad III el alumno podrá identificar las diferentes formas de corrosión y sus mecanismos. En la Unidad IV se proporcionan herramientas necesarias para poder evaluar la velocidad de corrosión. Finalmente, la unidad V da a conocer los diferentes métodos que existen en el tema de protección y control contra la corrosión. Con los conocimientos proporcionados en esta asignatura, el alumno será capaz de proponer alternativas que permitan disminuir este fenómeno en un ambiente determinado.

El material podrá ser consultado por los alumnos, vía Internet a través de la página de la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, en su liga con el Campus Virtual. Previo a su utilización, los alumnos serán capacitados en el uso de la plataforma Blackboard. Este material se podrá ir actualizando de acuerdo a las necesidades al igual que se podrá ir complementando para que en planes futuros se pueda contar con un curso completamente no presencial.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, en este documento se:

- Describe la metodología para la elaboración de material didáctico mediante investigación bibliográfica y enriquecimiento de material didáctico base, para la elaboración de: a) Formatos de información, b) Mapas conceptuales, c) Unidades didácticas, d) Presentaciones y e) Material Auxiliar (CAPITULO I).
- Presenta el paquete didáctico de la Asignatura de Corrosión y Degradación que lo conforma los a) Formatos de información, b) Mapas conceptuales, c) Unidades didácticas, d) Presentaciones y e) Material Auxiliar (CAPITULO II). Esta información queda disponible en un CD, el cual se anexa a este trabajo escrito.
- Y finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de este material didáctico.

CAPITULO I.

METODOLOGIA GENERAL PARA EL DISEÑO DEL PAQUETE DIDACTICO.

La metodología consiste en crear material de apoyo a las clases presenciales de la materia de Corrosión y Degradación para la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de Materiales, incorporando las nuevas tecnologías de información, a través de la creación de objetos de aprendizaje los cuales están en la plataforma virtual. Se utilizarán técnicas centradas en los estudiantes con la finalidad de que el material sea atractivo para los alumnos y a la vez promueva su correcto desarrollo académico. A fin de facilitar un aprendizaje más ágil, participativo, activo, constructivo y hasta divertido, favoreciendo el desarrollo de diversas habilidades, actitudes y valores; siempre y cuando los programas estén bien diseñados con objetivos, contenidos y planteamientos pedagógicos específicos.

Con la creación de objetos de aprendizaje será posible brindar apoyo a las clases presenciales de la materia en cuestión, estos objetos serán un apoyo a sus clases con lo cual será posible reforzar los conocimientos del alumno, y en un futuro próximo estos objetos servirán de base para ser actualizados, mejorados y reutilizados para la creación de un curso de la materia de Corrosión y Degradación totalmente virtualizada.

Para la elaboración del paquete didáctico de la asignatura de Corrosión y Degradación se realizan una serie de actividades que tienen como propósito mejorar el sistema de aprendizaje, mediante: información general del curso, investigación bibliográfica, utilización de material didáctico base, el uso de imágenes y las propias herramientas que se ofrecen en la plataforma virtual para el enriquecimiento y elaboración de mapas conceptuales, unidades didácticas, presentaciones en Power-Point® y publicación de material auxiliar (Edición de imágenes y Trabajos de congreso de la SMEQ).

1.1 ELABORACION DE FORMATOS.

El Campus Virtual de la Universidad Autónoma de Hidalgo diseñó cuatro formatos de información general del curso los cuales serán utilizados en el desarrollo de las asignaturas digitalizadas.

Estos formatos son:

- | | |
|-------------------------------|------------|
| 1.- Información del profesor. | Formato 01 |
| 2.- Información del curso. | Formato 02 |
| 3.- Planeación de contenidos. | Formato 03 |
| 4.- Guía de estudio. | Formato 04 |
| 5.- Acuerdo de academia. | Formato 05 |

Con el fin de no desviar la atención de la Metodología General para el Diseño del Paquete Didáctico, el desarrollo de esta información es abordada en el capítulo II de este trabajo.

1.2 ELABORACION DE MAPAS CONCEPTUALES [26] [27].

Los mapas conceptuales permiten representar de manera gráfica los contenidos de algún programa, Unidad de aprendizaje o tema, permitiendo la organización y sobre toda la jerarquización del contenido.

Los mapas conceptuales son de gran utilidad tanto para activar esquemas relativos a un tema específico como para reafirmar conocimientos nuevos que ayuden a su comprensión.

Un mapa conceptual es una herramienta cognitiva, a través de la cual, podemos representar contenido temático de una disciplina científica, de los programas curriculares o del conocimiento de una manera gráfica y sintética, orientado al aprendizaje eficiente y significativo. Además permiten la organización y jerarquización del conocimiento de un tema y se puede utilizar antes, durante o después de enseñar un contenido. Este instrumento educativo fue ideado por Joseph Novak en los años 70, como una forma de poner en práctica las teorías de David Ausubel sobre Aprendizaje Significativo, es por ello que en la construcción de mapas conceptuales se enfatiza la importancia para ser capaz de aprender nuevos conceptos en forma de proposiciones.

Un mapa conceptual sencillo puede estar compuesto por dos o tres palabras unidas por un conector para generar una proposición, un ejemplo sencillo de un mapa conceptual se muestra en la figura 1.

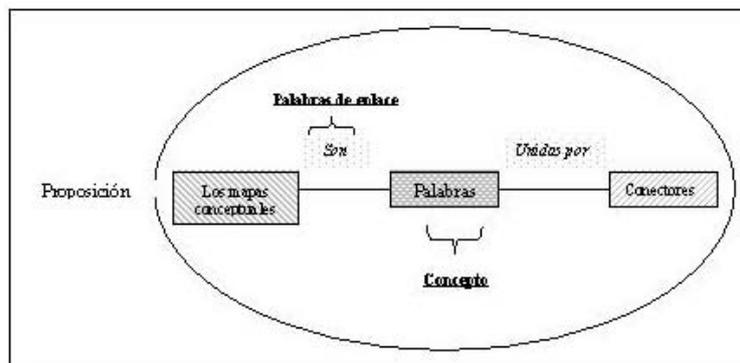


Fig. 1 Ejemplo de un mapa conceptual.

Los **conceptos** se refieren a objetos, eventos o situaciones y se representan en círculos o rectángulos llamados nodos. Las **proposiciones** representan la unión de dos o más conceptos relacionados entre sí, mediante una palabra de enlace. Las **palabras de enlace** expresan el tipo de relación existente entre dos o más conceptos y se representan a través de **líneas**.

La importancia que tiene la construcción de mapas conceptuales en el aprendizaje es que permite diseñar un ambiente de aprendizaje donde se estimula no solo la representación del conocimiento, sino también información textual y/o adicional que se organiza jerárquicamente. Por otra parte, facilitan una rápida visualización de los contenidos de aprendizaje a través de la detección de conceptos clave así como de sus relaciones; así mismo, sirven como un modelo para que los alumnos aprendan a elaborar mapas conceptuales de otros temas.

De esta forma el mapa conceptual puede ser utilizado con diferentes propósitos al proceso de enseñanza aprendizaje algunos de ellos son:

1. Generar ideas (lluvia de ideas)
2. Diseñar una estructura compleja (textos largos, medios, sitios Web, etc.)
3. Comunicar ideas complejas
4. Ayudar a aprender integrando explícitamente conocimiento previo y nuevo.
5. Evaluar o diagnosticar la comprensión.
6. Realizar una presentación inicial del tema o de la unidad, facilitando así que los alumnos incorporen los nuevos conocimientos a un esquema previo.
7. Elaborar una visión completa y global al finalizar el desarrollo de la unidad.
8. Aportar una riqueza visual para superar la linealidad y secuencialidad.

Para fines del material didáctico de la asignatura de Corrosión y Degradación los mapas conceptuales se utilizarán para realizar la presentación inicial de éste y de las unidades que la integran. Esta información es abordada en el Capítulo II de este trabajo con el fin de no desviar la atención en la Metodología General para el Diseño del Paquete Didáctico

1.3 ELABORACION DE GUIAS DIDÁCTICAS [23][25] (Estructura por unidad didáctica).

La elaboración de una guía didáctica es fruto de un proceso de reflexión previo a través del cual el equipo docente va a intentar suplir todas aquellas carencias que el material didáctico base (unidades didácticas propias u otros textos base elaborados por autores externos) pueda presentar. Incluso en el caso de que el material didáctico sea autosuficiente, la introducción a la guía didáctica va a ser esencial como elemento motivador, que sirva para suscitar el interés del lector (que en este caso no es otro que el alumno), al cual se le va a enganchar mediante las distintas estrategias que el equipo docente decida incorporar en la introducción. Más allá del plano motivacional pero estrechamente relacionado con él, la introducción va a servir para estructurar tanto la presentación de contenidos que en la guía didáctica se van a tratar, como el tipo de interacción didáctica con los alumnos.

Por la importancia y la manera en la cual deben ser presentadas, la estructura por unidades didácticas se esquematiza en la figura 2.



Fig. 2 Esquema de estructuras de Unidades Didácticas.

1.3.1 Introducción.

La introducción a la guía didáctica se podría considerar como un organizador previo puesto que anticipa tanto el marco conceptual y contextual para organizar la información que se va transmitir, como el nivel máximo exigible para que el alumno tenga éxito en el aprendizaje de la asignatura. El hecho de que la introducción funcione como organizador previo se debe a que, aparte de contener información introductoria y contextual, en primer lugar, funciona como puente cognitivo entre la información nueva y la que el alumno ya sabe, puesto que posee un nivel de generalidad mayor, que engloba a los conceptos y contenidos familiares al alumno. Además, facilita la activación de sus conocimientos previos, permitiendo que tenga una visión global y contextual de lo que va a aprender. Por otra parte, ayuda a organizar la información por niveles jerárquicos, ya que no todos los contenidos tienen el mismo grado de importancia o dificultad; y por último ofrece un marco conceptual que permite integrar la información que va a aprender, evitando así la memorización de contenido aislados e inconexos.

Al elaborar la introducción se toma en cuenta todo aquel conjunto de conceptos clave, de generalizaciones, de ideas o de hechos que es conveniente que los estudiantes adquieran tras leer la introducción al texto y durante el proceso de aprendizaje y que son propios de la asignatura. De manera complementaria se debe atender a la terminología relacionada con lo que se va a aprender, pero que no pertenece necesariamente a dicha asignatura, sino a una parte del repertorio de su área de conocimiento. Se debe tener muy presentes los conocimientos previos que serían adecuados para alcanzar una correcta comprensión del texto, de sus objetivos y de las actividades que en él se propongan, conocimientos sobre los cuales se van a construir en un futuro muchos otros de mayor complejidad [23].

La organización de la introducción utilizada en este trabajo se presenta en la figura 3.



Fig.3 Esquema de organización de la introducción.

En primer lugar, incluir una presentación de la asignatura, que refleje tanto su denominación como toda aquella información relativa a su contenido, su importancia en general y cuál es su razón de ser.

Después, especificar el contexto en el que se encuentra ubicada la asignatura y su vigencia dentro de dicho contexto. Ello implica hacer alusión a la importancia de la asignatura dentro del campo de estudio, y a toda aquella información que ubique la asignatura dentro del programa académico específico al que está vinculada.

A continuación, se concretan qué requisitos o conocimientos previos son necesarios para abordar correctamente la asignatura. Este epígrafe, tal y como se ha venido mencionando, hace referencia a los conocimientos anteriores que el estudiante debería poseer para lograr un correcto abordaje de la asignatura. Esta información no se debe desestimar y es clave para el alumno, pues en ella se le detalla lo que se le va a exigir y los conocimientos de los que va a partir el profesor.

En cuarto lugar, se hace referencia a las conexiones externas de la asignatura o relación de ésta con otras asignaturas, tanto del mismo curso académico como de otros cursos, incluso pertenecientes a otro ciclo académico. De esta manera, no es raro encontrar que están fuertemente relacionadas con otras asignaturas a la que amplían, complementan o simplemente introducen.

Finalmente, se hace mención específica a la aplicabilidad, utilidad y valor práctico asociado a la asignatura y a las situaciones o contextos en los que se pueden poner en práctica tanto los conocimientos teóricos como las habilidades prácticas que el alumno adquiera y se espera desarrolle con la asignatura. Tal y como se ha mencionado anteriormente, ello podría dar pistas importantes al alumno acerca de las futuras salidas académicas y/o profesionales que el alumno obtendrá tras complementar el currículo académico de la carrera que esta cursando. Esta es una forma muy útil de orientar tanto académica como profesionalmente al alumno.

1.3.2 Objetivos [23] [25].

Cualquier proceso de enseñanza requiere definir objetivos claros, realistas, precisos, concretos y medibles, para de ese modo satisfacer las necesidades que le dieron origen.

Los objetivos de aprendizaje consisten en la descripción de la conducta que se pretende alcanzar por los participantes (alumnos) como resultado del proceso de enseñanza y aprendizaje. Se trata de elementos de gran importancia, ya que iluminan y orientan todo el proceso educativo.

Respecto a los objetivos propiamente dichos son enunciados precisos sobre lo que se pretenda que alcancen los alumnos con el estudio de la asignatura como resultado de los procesos de enseñanza y aprendizaje. En general, se podría decir que los objetivos son afirmaciones que permiten a los estudiantes conocer lo que pueden conseguir tras la realización de alguna actividad. Estas afirmaciones, no sólo atraen la atención del estudiante y activan sus conocimientos previos y su preparación, sino que también contribuyen a la consecución de una mayor comprensión de la actividad. (Cooper, 1986:82).

Su formulación debe ser tal que estén orientados hacia el trabajo de los alumnos, por lo que deberán construirse con un lenguaje directo, claro y entendible, utilizando para ello una acción y vocabulario apropiados, un objetivo es útil en la medida en que se señale lo que el alumno debe ser capaz realizar para dar constancia de que ha alcanzado la conducta deseada.

Los estudiantes se benefician de unos objetivos bien diseñados en cuanto a que:

- Les indican qué es lo que se supone deberían hacer, reduciendo en cierta medida las ambigüedades propias de todo aprendizaje.

- Los objetivos pueden ayudar al alumno a decidir si realmente le interesa el curso, si está dentro de sus posibilidades o simplemente si ya domina las capacidades que pretenden lograrse con el curso, módulo o lección.
- Les proporcionan un marco de referencia respecto al que comprobar sus progresos sin tener que esperar a la evaluación final, ya que en caso de saldarse ésta con un fracaso el alumno difícilmente puede volver a encauzar su aprendizaje. Si el objetivo es lo suficientemente claro debe permitir que el estudiante se auto evalúe de forma continua y remedie las deficiencias, si es necesario.

A la hora de presentar los objetivos conviene que:

- Sean comprensibles para el estudiante, evitando la terminología que aún le sea desconocida, así como palabras vagas (¿qué es exactamente comprender el genoma humano?, ¿en qué consiste saber las causas de la Guerra Civil española?).
- Se formulen en términos positivos puesto que resultan mucho más fáciles de comprender.
- Sean lo suficientemente específicos, señalando quién, qué, dónde, cómo, cuándo y durante cuánto tiempo van a participar en el proceso de aprendizaje. Por ejemplo, en lugar de decir liste los componentes de la atmósfera, sería más útil proponer que liste los cinco componentes más abundantes de la atmósfera.
- No abrumen al estudiante, ya sea con una lista interminable de objetivos, ya sea que dentro de los objetivos se enumeren demasiadas condiciones y rangos de competencia. Lejos de ayudarlo, terminarán por confundirle más.
- No se limiten a un mero listado. Por el contrario, los objetivos deberían ponerse en relación con distintos aspectos como el conocimiento previo del estudiante, los contenidos que se especifican en el material o las actividades que se van a realizar.
- Resulten atractivos y motivadores, de forma que capten la atención de los estudiantes. Uso de un lenguaje accesible.

1.3.3 Orientaciones para el Estudio.

La enseñanza a distancia, comparada con la formación presencial, implica un mayor esfuerzo individual por parte del alumno, que en muchas ocasiones se enfrenta a una tarea difícil sin una adecuada organización del tiempo y de las actividades de aprendizaje. Las orientaciones para el estudio suponen el seguimiento de una serie de acciones que debe tomar en cuenta el estudiante para preparar el aprendizaje de la asignatura de la manera más eficiente posible.

De manera general podemos considerar dos tipos de orientaciones. Por un lado están las orientaciones externas al alumno y por otro las orientaciones internas al alumno. Las orientaciones externas se refieren a las condiciones ambientales para el estudio; específicamente nos referimos al espacio físico: lugar de trabajo, condiciones de

mobiliario, temperatura, iluminación o el equipo necesario, sobre todo en casos de contenidos de procedimiento tales como las prácticas de laboratorio.

Las internas, dan cuenta de una serie de técnicas y hábitos de estudio que cada alumno emplea para aprender.

Es importante que las orientaciones para el estudio, estén claramente relacionadas con los objetivos de aprendizaje, así como con los contenidos y las autoevaluaciones y de la asignatura y que las dudas que surjan a lo largo del proceso de aprendizaje pueda resolverlas con ayuda del profesor o del tutor.

Entre los objetivos prioritarios de la Enseñanza a Distancia se encuentra el desarrollo de diversas habilidades que favorecen el aprendizaje independiente de los alumnos.

Esto se puede ver claramente facilitado mediante las orientaciones para el estudio, ya que constituyen un eje fundamental para anticipación de posibles dificultades, así como para el perfeccionamiento de destrezas que no sólo le servirán al alumno en su aprendizaje a distancia, sino que también podrá transferirlas a otros ámbitos; de esta manera, verá facilitada una rápida organización del tiempo y de las actividades, logrará desarrollar hábitos y técnicas de estudio, verá favorecida su motivación y logrará un aprendizaje más profundo.

1.3.4 Estructuras Temáticas.

Corresponde al temario, es decir a qué se debe enseñar para alcanzar los objetivos establecidos. Si se omite su importancia la instrucción será inconsistente, es decir, conductas en el alumno sin utilidad personal ni social.

Dentro de este apartado se listan el conjunto de temas y subtemas de la asignatura a impartir que para este caso son:

Unidad I: INTRODUCCIÓN.

- 1.1 Definición.
- 1.2 Ingeniería de corrosión.
- 1.3 Medio ambiente.
- 1.4 Costos ocasionados por la corrosión.
- 1.5 Daños por corrosión.

Unidad II: FUNDAMENTOS ELECTROQUÍMICOS.

- 2.1 Reacciones electroquímicas de oxidación.
- 2.2 Formación de celda.
- 2.3 Electrodo mixto. Polarización.
- 2.4 Pasivación.
- 2.5 Crecimiento de la capa de óxido.
- 2.6 Efecto del oxígeno, temperatura y concentración sobre la velocidad de corrosión.

Unidad III: FORMAS DE CORROSIÓN.

- 3.1 Clasificación de la corrosión.
- 3.2 Corrosión uniforme.
- 3.3 Corrosión galvánica.
- 3.4 Corrosión por erosión.
- 3.5 Corrosión por socavados.
- 3.6 Corrosión por picaduras.
- 3.7 Corrosión selectiva.
- 3.8 Corrosión intergranular.

- 3.9 Corrosión por tensión.
- 3.10 Corrosión por fragilización de hidrógeno.
- 3.11 Corrosión microbiológica.

Unidad IV: EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

- 4.1 Unidades de la velocidad de corrosión.
- 4.2 Diagramas de Pourbaix.
- 4.3 Curvas de polarización.
- 4.4 Diagramas de Evans.
- 4.5 Medidas de impedancia.
- 4.6 Resistencia a la polarización.
- 4.7 Pruebas de corrosión.
- 4.8 Medición de la corrosión en plantas de proceso.

Unidad V: PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN.

- 5.1 Revestimiento orgánico e inorgánico.
- 5.2 Protección metálica.
- 5.3 Inhibidores de corrosión.
- 5.4 Protección catódica.
- 5.5 Protección anódica.

1.3.5 Desarrollo de Contenidos.

Los contenidos responden a la pregunta de ¿Qué enseñar-aprender? Las áreas o campos del conocimiento, las teorías, las corrientes y formas de pensamiento, las distintas capacidades, destrezas, comportamientos o actitudes, las formas culturales, la investigación son la base en la que se apoya la propuesta de contenidos. Los contenidos dan solidez al currículo, pero no los entendemos como determinantes absolutos del mismo así se hacía en la enseñanza tradicional sino como elementos fundamentales que se ven reforzados por los otros componentes del currículos.

Mediante su asimilación se supone que el individuo habrá alcanzado los objetivos propuestos. Los contenidos han de estar plenamente concatenados con los objetivos de manera que se condicionen mutuamente.

En los contenidos habrá que cuidarse la ordenación de su presentación, la secuenciación. El orden en el que se presentan los contenidos suele tener incidencia en los resultados de aprendizaje, tanto en su cantidad como en su calidad. En esta secuencia habrá de considerarse la necesidad de aprendizajes previos antes de acometer otros más complejos, la importancia de unos contenidos sobre otros y la tensión dada según esa importancia. Para el desarrollo de contenidos estos pueden ser propios o recopilados.

Los contenidos recopilados son aquellos obtenidos de otra fuente, es decir que no son propiamente elaborados. Es importante indicar la referencia bibliográfica de esas fuentes en donde comienzan los contenidos recopilados.

1.4 ELABORACION DE PRESENTACIONES.

Prácticamente, hasta bien entrada la década de los años cuarenta del presente siglo no se iniciaron experiencias de educación a distancia que utilizaran medios distintos al escrito. Hoy, en la era tecnológica, continúa siendo vehículo fundamental de transmisión de los contenidos de aprendizaje, el material impreso auto instructivo. Según revelan diversas investigaciones, este material consumía en la pasada década de los 80, al menos las tres cuartas partes del tiempo total del trabajo del alumno. Recientes estimaciones indican que, al menos un 80 % del aprendizaje, tanto escolar como a distancia, todavía está basado enteramente en el material impreso con algunos apoyos tecnológicos. Aunque nos encontremos en la era de la computación, microelectrónica y telecomunicación, el papel impreso –primera generación de medios didácticos en enseñanza a distancia- continúa jugando un papel esencial en los procesos de aprendizaje (García Aretio, 1993).

La elaboración de las presentaciones de la asignatura de Corrosión y Degradación son fruto de un proceso de reflexión previo a través del cual se pretenden suplir todas aquellas carencias que el material didáctico pueda presentar. Estas presentaciones se elaboran con información de los contenidos de la asignatura de Corrosión y Degradación, utilizando la aplicación de Microsoft Power Point® (Todas las presentaciones están contenidas en una plantilla modelo, otorgada por la institución) como una herramienta más para suscitar el interés del alumno, a la vez que promueven su correcto desarrollo académico. A fin de facilitar un aprendizaje más ágil, participativo, activo, constructivo y hasta divertido, favoreciendo el desarrollo de diversas habilidades, actitudes y valores.

Con el fin de no desviar la atención de la Metodología General para el Diseño del Paquete Didáctico, el desarrollo de esta información es abordada en el Capítulo III de este trabajo.

1.5 ELABORACION DE MATERIAL AUXILIAR.

Como complemento de clases en el aula el modelo de enseñanza y aprendizaje que se seguirá para la asignatura de Corrosión y Degradación es el de Presencial en el uso de las nuevas tecnologías de información y comunicación. El curso dispone de material auxiliar como lo son la edición de imágenes, uso Ilustraciones y ejemplos de trabajos de congreso de la SMEQ.

Toda esta información estará disponible para los alumnos en la plataforma virtual de la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, en su liga con el Campus Virtual

CAPITULO II.

PAQUETE DIDÁCTICO DE LA ASIGNATURA DE CORROSIÓN Y DEGRADACIÓN

2.1 FORMATOS DE INFORMACION.

En este apartado se presentan los formatos de información general obtenidos referentes al curso de Corrosión y Degradación.

En primer lugar se presenta el Formato 1, titulado: Información de Profesor, en donde se dan a conocer los datos particulares del catedrático y del personal de apoyo que desarrollaron este material didáctico de la materia en cuestión.

En el Formato 2, llamado: Información del Curso, se mencionan los datos generales de este, como son: el nivel en el que se ofrece, el programa académico al que pertenece, las horas a la semana, el tipo de curso, la modalidad, los créditos, etc. También contempla un apartado sobre los pre-requisitos necesarios para el curso, una breve introducción, los objetivos generales, la estructura temática, la metodología de enseñanza-aprendizaje, el sistema de evaluación, las políticas del curso, fecha de elaboración y fecha de implementación.

En el Formato 3; Planeación de contenidos, se presentan los objetivos que se pretenden alcanzar por unidad, las estrategias de aprendizaje (individuales y colaborativas), medios de apoyo y productos de evaluación.

En el Formato 4, de nombre: Guía de Estudio, se resumen las actividades preliminares, integradoras y de estudio propuestas para cada Unidad Didáctica, donde se puede consultar el nombre, los temas, la calendarización, los objetivos específicos, etc. para cada una de estas unidades.

En el Formato 5; Acuerdo de academia. Es un acuerdo en que la academia de Físicoquímica ha procedido a la adecuación a formato digital la asignatura de Corrosión y Degradación para el uso de las nuevas tecnologías de información y comunicación en clases presenciales.

FORMATO 01: INFORMACIÓN DEL PROFESOR

ID:

Nombre completo	V́ctor Esteban Reyes Cruz
E-mail:	a) Institucional: vreyes@uaeh.reduaeh.mx b) Alternativo: reyescruz16@yahoo.com
Teléfono oficina	(01771) 7172000 Ext. 6713
Breve Currículum Vitae con fotografía 	<p>Formación Académica.</p> <ul style="list-style-type: none"> ♦ LICENCIATURA en Ingeniería Química, egresado del Instituto Tecnológico de Pachuca (1991), titulación por promedio. Cédula 3907144. ♦ MAESTRÍA EN QUÍMICA especialidad Electroquímica, egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa (1998). Tema de investigación: “Estudio Preliminar para Establecer las condiciones de Operación de un Reactor Tridimensional, para Recuperar oro y plata de Disoluciones Provenientes de la Lixiviación de Minerales con Cianuro”. Cédula 3907143. ♦ DOCTORADO EN CIENCIA especialidad en Ingeniería Electroquímica, egresado de la Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa (2002). Tema de investigación: “Recuperación Selectiva de “DORÉ” (Au-Ag) de Disoluciones Provenientes de la Lixiviación de Minerales, Utilizando un Reactor Electroquímico FM01-LC”. Cédula 3907144. <p>Experiencia docente</p> <ul style="list-style-type: none"> ♦ Catedrático de la Asignatura de Corrosión y Degradación en la carrera de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias de los Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (Enero del 2003 a Diciembre del 2004). ♦ Catedrático de la Asignatura de Corrosión y Degradación en la carrera de Licenciatura en Ingeniería Minero Metalúrgica de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (Enero del 2003 a Diciembre del 2004). ♦ Catedrático de la Asignatura de Recubrimientos en la carrera de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias de los Materiales de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (Enero- Diciembre 2003). ♦ Catedrático del curso de Corrosión y Técnicas Electroquímicas en el Facultad de Ingeniería de la Universidad de Colima (Marzo 2004). <p>Experiencia profesional.</p> <ul style="list-style-type: none"> ♦ Inspector de Control de Calidad en Línea de Producción de envases de Plástico para Coca-Cola de la empresa Especialidades Tecnológicas (Ene- Mayo 1992). ♦ Laboratorista Auxiliar en el Laboratorio de Química Analítica del Instituto Tecnológico de Pachuca (Jun. - Ago. 1992). ♦ Jefe de Sector de Seguridad en Efluentes y Almacenamientos de LPG y Jefe de Seguridad y Contra incendio de la Supticia. de Seguridad de PEMEX Refinación en Refinería Miguel Hidalgo (Nov. 1992 - Ene 1996) ♦ Profesor Investigador de Tiempo completo titular C de la UAEH (2002 a la fecha) <p>Participación en proyectos y eventos académicos. Proyectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ♦ Participación en el proyecto “Electrólisis de Oro y Plata disueltos en solución de cianuros”. Con Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V y la UAMI (1997-1999).

	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Responsable del proyecto PAU 35 "Estudio fundamental electroquímico de la recuperación de plata de los desechos sólidos de la industria fotográfica y radiográfica" de la UAEH (Enero 2003). Monto \$69,914.00 ◆ Responsable del proyecto de Fondos Mixtos del Estado de Hidalgo: "Evaluación de las alternativas para la disminución del impacto ambiental por jales históricos en el distrito minero de Zimapán" de la UAEH (Abril 2004). En este proyecto se trabajaron en colaboración las Universidades de UASLP y UAMI con la UAEH. Monto \$ 1,001,798.00 ◆ Responsable del proyecto Promep: "Recuperación de plata proveniente de los efluentes de los desechos de la industria fotográfica y radiográfica en un reactor electroquímico FM01-LC" (Febrero 2004). Monto \$121,700.00 ◆ Elaboración del proyecto PAU 2004: "Electrodeposición de <i>doré</i> proveniente de soluciones cianuradas de la industria minera" (Febrero 2004) <p>Eventos académicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Participación como organizador del XIV Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva (abril 2004). ◆ Participación como moderador dentro del XIV Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva (abril 2004). ◆ Sinodal del trabajo de Tesis de Maestría "Lixiviación de Plata con Tiourea Electro-Oxidada" que presento la alumna María Concepción López Escutia del Posgrado en Ingeniería Química de la UAMI (Abril 2003). ◆ Participación como Monitor en el examen de selección de aspirantes a ingresar a la UAEH (Diciembre 2003). ◆ Participación como Monitor en el examen de selección de aspirantes a ingresar a la UAEH (Julio 2004). ◆ Sinodal del trabajo de Tesis de Maestría "Electrodeposición selectiva de plata a partir de soluciones de tiosulfatos amoniacal" que presento el alumno I. Q. Alejandro Alonso Gómez del Posgrado en Ingeniería Química de la UAMI (Septiembre 2004). ◆ Sinodal del trabajo de Tesis de Licenciatura "Estudio electroquímico del proceso de depósito de iones metálicos sobre carbón vítreo" que presento la alumna Dulce Berenice Vargas de Santiago (Septiembre 2004) <p>Producción Académica y de investigación.</p> <p>Artículos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ V. E. Reyes, M. T. Oropeza, I. González and C. Ponce de León, "Electrochemical recovery of silver from cyanide leaching solutions", J. Appl. Electrochemical., 32 (2002) 473. ◆ V. E. Reyes, M. T. Oropeza, I. González and C. Ponce de León, "Electrochemical deposition of silver and gold from cyanide leaching solutions", Hydrometallurgy 65/2-3 (2002)187 ◆ V. E. Reyes, M. T. Oropeza and I. González, "Electro-recovery of gold and silver from a cyanide leaching solution using a three-dimensional reactor", Electroquímica Acta, 49, (2004) 4417 - 4423. ◆ V. E. Reyes, I. González and M. T. Oropeza, "Voltammetric evaluation the electrode material on the oxidation of cyanide catalyzed by copper ions", J. of Solid State Electrochemistry, (Sometime in Enero 2004). ◆ V. E. Reyes, M. T. Oropeza and I. González, "Influence of area, potential and linear flow velocity on selective electrorecovery of "dore" (gold and silver) from a cyanide leaching solution in a FM01-LC reactor", Minerals Engineering (Sometime in Mayo 2004) <p>Publicaciones en Congresos</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ Depósito electroquímico de oro a partir de soluciones cianuradas de lixiviación. XIII Congreso Nacional De la sociedad Mexicana de Electroquímica; Torreón Coahuila del 7-9 de septiembre de 1998.
--	--

	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Oxidación de cianuros catalizada por la presencia de iones cobre en solución. XIII Congreso Nacional De la sociedad Mexicana de Electroquímica; Torreón Coahuila del 7-9 de septiembre de 1998. ◆ Depósito electroquímico de plata a partir de soluciones cianuradas de lixiviación. XIV Congreso Nacional de Electroquímica; Mérida, Yucatán del 24 al 28 de agosto de 1999. ◆ Evaluación voltamperométrica de la influencia del sustrato en la oxidación catalizada de cianuros por iones cobre. XIV Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Electroquímica y . XV Congreso Nacional de Electroquímica; Oaxaca, Oaxaca del 7 al 12 de mayo de 2000. ◆ Depósito electroquímico de plata y oro a partir de soluciones cianuradas de lixiviación. XIV Congreso de la Sociedad Iberoamericana de Electroquímica y XV Congreso Nacional de Electroquímica; Oaxaca, Oaxaca del 7 al 12 de mayo de 2000. ◆ Recuperación electroquímica de Ag a partir de soluciones cianuradas de lixiviación. XVI Congreso Nacional de la SME; Santiago de Querétaro, del 22 al 26 de mayo de 2001. ◆ Recuperación selectiva de Au-Ag a partir de licores de lixiviación de minerales utilizando un reactor electroquímico tipo Batch. XVII Congreso Nacional de la SME; Monterrey, Nuevo León, del 26 al 30 de mayo de 2002. ◆ Recuperación selectiva de "DORE" (Au-Ag) de disoluciones provenientes de la lixiviación de minerales, utilizando un reactor electroquímico FM01-LC. XVIII Congreso Nacional DE la SMEQ; Chihuahua, Chihuahua, del 26 al 30 de mayo del 2003. ◆ Influencia del área, el potencial y la velocidad lineal de flujo en la recuperación selectiva de "Dore" (oro y plata) proveniente de una solución lixivante de cianuros en un reactor electroquímico FM01-LC. XIV Congreso Internacional de Metalurgia, del 28 al 30 de Abril de 2004 en Pachuca, Hgo. ◆ Recuperación de plata proveniente de los desechos sólidos de la Industria Fotográfica y Radiográfica. XIX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ); del 24 al 28 de Mayo de 2004 en San Luis Potosí ◆ Influencia de la relación CN⁻/Cu⁺ y el sustrato en la oxidación catalizada de cianuros por iones cobre. XIX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ) del 24 al 28 de Mayo de 2004 en San Luis Potosí ◆ Diagramas de Pourbaix y el efecto de la actividad, para sistemas M⁺-H₂O. XIX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ); del 24 al 28 de Mayo de 2004 en San Luis Potosí. ◆ Recuperación de plata de las soluciones provenientes de los desechos de la industria fotográfica, XIII International Materials Research Congress del 22 al 26 de agosto del 2004 en Cancún.
<p>Personal de Apoyo (Créditos)</p>	<p>Israel Navarrete Ramírez, Alumno de la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de los Materiales.</p>

FORMATO 02: INFORMACIÓN DEL CURSO

Nivel en que se ofrece	Licenciatura
Dependencia de Educación Superior (DES)	ICBI
Programa Académico	Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de los Materiales
Nombre oficial de la asignatura, curso o módulo	Corrosión y Degradación
Semestre en el que se imparte o ubicación dentro del plan de estudios.	Séptimo semestre
Clave de asignatura (ID)	ICM037CIMMCD
Tipo de curso (básico, optativo, remedial...)	Básico
Modalidad	Presencial en el uso de las nuevas tecnologías de información y comunicación como complemento de clases en el aula.
Duración	6 horas semana/mes
Seriación (si/no)	No
Créditos	10
Horas/teoría/semana/mes	4 horas
Horas /práctica/semana/mes	2 horas
Horas totales por curso (módulo)	96 horas

PRE-REQUISITOS DE ESTUDIO

La materia de Corrosión y Degradación requiere de los conocimientos de los siguientes conceptos:

- 1.- Reacciones Redox de la asignatura de Química General.
- 2.- Transporte de materia: Difusión y Transferencia de Masa de la asignatura de Fenómenos de Transporte
- 3.- Potencial químico, potencial electroquímico y energía libre de Gibbs de la asignatura de Termodinámica.

Estos conocimientos son de vital importancia para que el alumno tenga un aprendizaje significativo del proceso de la corrosión y degradación que sufren los materiales.

Por otra parte también es indispensable el dominio de las herramientas informáticas básicas (Word, Excel, Power Point) e Internet a fin de poder utilizar de manera efectiva las herramientas de comunicación de la plataforma virtual, que se utilizará como apoyo a las clases presenciales.

INTRODUCCIÓN

La corrosión es un fenómeno que se ha estudiado durante muchos años debido a las pérdidas económicas, humanas y ambientales que esta ocasiona. Las pérdidas económicas han sido el principal motivo para realizar estudios de investigación en corrosión, se estima que en E.U. anualmente esto representa el 4% de su producto interno bruto. Por otra parte, en México se han realizado muchos estudios sobre los efectos de la corrosión y a pesar de esto, no se tienen datos precisos de las pérdidas económicas que se generan por este concepto. Sin embargo su impacto es tan amplio que sólo por referir algunos, se relacionan los siguientes daños económicos:

- Reposición de tuberías y equipos domésticos e industriales.
- Inversiones para su control y prevención.
- Daños a instalaciones marinas y costeras.
- Desgaste de piezas metálicas en automotores.
- Paros de plantas.
- Sobre espesor en el diseño de equipos e instalaciones.
- Pérdida y contaminación de productos.

Ante este hecho el estudio del fenómeno de la corrosión y degradación de los nuevos materiales y los ya existentes es de suma importancia. Los conocimientos que adquieran los ingenieros en materiales en el fenómeno de corrosión les dará las herramientas necesarias para poder proponer soluciones que controlen y prevean los daños ocasionados por este fenómeno.

En este curso el alumno en las dos primeras unidades alcanzara un nivel de comprensión del fenómeno de la corrosión que le permitirá en las unidades III, IV y V, aplicar estos conceptos. La estructura temática del curso se desglosara más adelante en este documento.

OBJETIVOS GENERALES

A partir de la comprensión del proceso de corrosión, el alumno será capaz de seleccionar un adecuado material que elimine o disminuya el proceso de corrosión en un ambiente determinado. Esta comprensión también le permitirá al alumno aplicar y manejar los diferentes diagramas, tablas y técnicas que se utilizan en el estudio de la corrosión de un material.

ESTRUCTURA TEMÁTICA

1.- INTRODUCCIÓN.

- 1.1 Definición.
- 1.2 Ingeniería de corrosión.
- 1.3 Medio ambiente.
- 1.4 Costos ocasionados por la corrosión.
- 1.5 Daños que ocasiona la corrosión.

2.- FUNDAMENTOS ELECTROQUÍMICOS.

- 2.1. Reacciones Electroquímicas.
- 2.2. Formación de celda.
- 2.3. Electrodo mixto
- 2.4. Polarización
- 2.5. Pasivación
- 2.6. Crecimiento de la capa de oxido.
- 2.7. Efecto del oxígeno, temperatura y concentración sobre la velocidad de corrosión.

3.- FORMAS DE CORROSIÓN.

- 3.1. Clasificación de la corrosión.
- 3.2. Corrosión uniforme
- 3.3. Corrosión galvánica.
- 3.4. Corrosión por erosión.
- 3.5. Corrosión por socavados.
- 3.6. Corrosión por picaduras.
- 3.7. Corrosión selectiva.
- 3.8. Corrosión intergranular.
- 3.9. Corrosión por tensión
- 3.10. Corrosión por fragilización de hidrógeno.
- 3.11. Corrosión microbiológica.

4.- EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

- 4.1. Unidades de la velocidad de corrosión
- 4.2. Diagramas de Pourbaix.
- 4.3. Curvas de polarización.

- 4.4. Diagramas de Evans.
- 4.5. Medidas de impedancia.
- 4.6. Resistencia a la polarización.
- 4.7. Pruebas de corrosión.
- 4.8. Medición de la corrosión en plantas de proceso

5.- PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN.

- 5.1. Revestimiento orgánico e inorgánico.
- 5.2. Protección metálica.
- 5.3. Inhibidores de corrosión.
- 5.4. Protección catódica.
- 5.5. Protección anódica.

METODOLOGÍA DE LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE

El modelo de enseñanza y aprendizaje que se seguirá para la asignatura de Corrosión y Degradación es el de Presencial en el uso de las nuevas tecnologías de información y comunicación como complemento de clases en el aula. El curso se desarrollara bajo la siguiente estrategia:

- ◆ Introducciones de las unidades temáticas
- ◆ Ejemplos.
- ◆ Cuadros sinópticos.
- ◆ Uso de ilustraciones.
- ◆ Análisis Y discusión grupal.
- ◆ Preguntas intercaladas.
- ◆ Resúmenes.

Los cuales estarán disponibles para los alumnos en la plataforma virtual de la UAEH.

SISTEMA DE EVALUACIÓN

La evaluación de la asignatura de Corrosión y Degradación se llevara a cabo de la siguiente forma:

1.- Se realizarán 3 evaluaciones parciales que corresponden al 70% de la calificación total
Los elementos que comprenden estas evaluaciones son:

a) Exámenes escritos	49.00%
b) Participación en la asignatura	5.25%
c) Tareas de investigación	5.25%
d) Asistencia	5.25%
e) Orden y limpieza	5.25%

2.- Se realizara 1 evaluación global que corresponde al 30% de la calificación total
Los elementos de esta evaluación Global son:

a) Examen escrito	21%
b) Exposición	4%
c) Reportes de practicas de laboratorio	5%

POLÍTICAS DEL CURSO

- ◆ Se tiene una tolerancia para entrar a clases de 5 minutos después de la hora programada de la impartición la asignatura.
- ◆ Se realizarán 3 evaluaciones ordinarias y una evaluación global.
- ◆ Esta estrictamente prohibido bromear en el laboratorio y en clases.
- ◆ Esta estrictamente prohibido consumir alimentos y bebidas en el laboratorio y en clases.
- ◆ Los trabajos y tareas que se soliciten deberán ser enviados en formado RTF y la entrega de estos forman parte de la evaluación del curso.

FECHA DE ELABORACIÓN

22 de Septiembre del 2004

FECHA DE IMPLEMENTACIÓN

20 de Enero del 2005

FORMATO 03: PLANEACIÓN DE CONTENIDOS

ID

Unidad de aprendizaje	Tiempo	Objetivo (s) por unidad	Estrategias de Aprendizaje		Medios/recursos de apoyo*	Productos de evaluación
			Individuales	Colaborativas		
<p>INTRODUCCIÓN.</p> <p>1.1 Definición.</p> <p>1.2 Ingeniería de corrosión.</p> <p>1.2 Medio ambiente.</p> <p>1.4 Costos ocasionados por la corrosión.</p> <p>1.5 Daños que ocasiona la Corrosión.</p>	10 hrs.	<p>1. Definir ¿que es la corrosión? y ¿cuales son los elementos que deben estar presentes para que esta se lleve a cabo?.</p> <p>2. Identificar la importancia del estudio de la corrosión en la vida cotidiana y en ámbito industrial.</p> <p>3. Mencionar las ingenierías que pueden estudiar la corrosión para que ellas den respuesta a las problemáticas que ocasiona este fenómeno en los materiales.</p>	<p>Integración de los contenidos del curso en sus propias palabras</p> <p>Establecimiento de relaciones</p> <p>Elaboración de analogías</p> <p>Repaso y relectura</p> <p>Trabajos extra clase</p> <p>Elaboración de notas durante la clase</p>	<p>Mapas conceptuales</p> <p>Organización de la información en esquemas</p>	<p>Pizarrón</p> <p>Presentación de Unidad I que se encuentran en la plataforma virtual.</p> <p>Presentaciones de trabajos de la industria del IMP que esta en la plataforma virtual.</p> <p>Memorias de congresos que se encuentran en la plataforma virtual.</p>	<p>Examen escrito</p> <p>Tareas</p> <p>Participaciones</p> <p>Asistencias</p> <p>Orden y limpieza</p>

Unidad de aprendizaje	Tiempo	Objetivo (s) por unidad	Estrategias de Aprendizaje		Medios/recursos de apoyo*	Productos de evaluación
			Individuales	Colaborativas		
<p>FUNDAMENTOS ELECTROQUÍMICOS.</p> <p>2.1. Reacciones Electroquímicas.</p> <p>2.2. Formación de celda.</p> <p>2.3. Electrodo mixto.</p> <p>2.4. Polarización.</p> <p>2.5. Pasivación.</p> <p>2.6. Crecimiento de la capa de oxido.</p> <p>2.7. Efecto del oxígeno, temperatura y concentración sobre la velocidad de corrosión.</p>	28 hrs.	1. Distinguir los fundamentos electroquímicos que rigen el proceso de corrosión.	<p>Integración de los contenidos del curso en sus propias palabras</p> <p>Repaso y relectura</p> <p>Trabajos extra clase</p> <p>Elaboración de notas durante la clase</p>	<p>Mapas conceptuales</p> <p>Organización de la información en esquemas</p> <p>Foro de debates</p>	<p>Pizarrón</p> <p>Acetatos</p> <p>Presentación de Unidad II que se encuentra en la plataforma virtual</p> <p>Capítulos de libros</p> <p>Practicas de laboratorio</p> <p>Foro de debates de la plataforma virtual.</p>	<p>Examen escrito</p> <p>Tareas</p> <p>Participaciones</p> <p>Asistencias</p> <p>Orden y limpieza</p>

Unidad de aprendizaje	Tiempo	Objetivo (s) por unidad	Estrategias de Aprendizaje		Medios/recursos de apoyo*	Productos de evaluación
			Individuales	Colaborativas		
FORMAS DE CORROSIÓN. 3.1. Clasificación de la corrosión. 3.2. Corrosión uniforme. 3.3. Corrosión galvánica. 3.4. Corrosión por erosión. 3.5. Corrosión por socavados. 3.6. Corrosión por picaduras. 3.7. Corrosión selectiva. 3.8. Corrosión intergranular. 3.9. Corrosión por tensión. 3.10. Corrosión por fragilización de Hidrogeno. 3.11. Corrosión microbiónica.	34 hrs.	1. Clasificar las diferentes formas de corrosión, su mecanismo y su control en un material dado. 2. Describir en un equipo de proceso o estructura que tipo de corrosión localizada está presente. 3. Interpretar las tablas de FEM y series Galvánicas como herramientas en el estudio de la corrosión.	Integración de los contenidos del curso en sus propias palabras Establecimiento de relaciones Elaboración de analogías Repaso y relectura Trabajos extra clase Elaboración de notas durante la clase	Mapas conceptuales Organización de la información en esquemas	Pizarrón Presentación de Unidad III que se encuentra en la plataforma virtual Capítulos de libros. Imágenes de la industria Practicas de laboratorio	Examen escrito Tareas Participaciones Asistencias Orden y limpieza Reportes de Practicas

Unidad de aprendizaje	Tiempo	Objetivo (s) por unidad	Estrategias de Aprendizaje		Medios/recursos de apoyo*	Productos de evaluación
			Individuales	Colaborativas		
<p>EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.</p> <p>4.1 Unidades de la velocidad de corrosión.</p> <p>4.2 Diagramas de Pourbaix.</p> <p>4.3 Curvas de polarización.</p> <p>4.4 Diagramas de Evans.</p> <p>4.5 Medidas de impedancia.</p> <p>4.6 Resistencia a la polarización.</p> <p>4.7 Pruebas de corrosión.</p> <p>4.8 Medición de la corrosión en plantas de proceso</p>	15 hrs.	<p>1. Evaluar la velocidad de corrosión mediante la aplicación de diferentes técnicas, métodos y procedimientos elaborados para esté propósito.</p> <p>2. Manejar como herramientas los diferentes diagramas (Tafel y Evans) provenientes de las técnicas electroquímicas de polarización que evalúan la corrosión para establecer las condiciones donde se evita o disminuye la corrosión de un material en un ambiente dado.</p>	<p>Integración de los contenidos del curso en sus propias palabras</p> <p>Establecimiento de relaciones</p> <p>Elaboración de analogías</p> <p>Repaso y relectura</p> <p>Trabajos extra clase</p> <p>Elaboración de notas durante la clase</p>	<p>Mapas conceptuales</p> <p>Organización de la información en esquemas</p>	<p>Pizarrón.</p> <p>Presentación de Unidad IV que se encuentra en la plataforma virtual</p> <p>Presentaciones de trabajos de la industria.</p> <p>Memorias de congresos que se encuentran en la plataforma virtual.</p> <p>Prácticas de laboratorio</p>	<p>Examen escrito</p> <p>Tareas</p> <p>Participaciones</p> <p>Asistencias</p> <p>Orden y limpieza</p> <p>Reportes de Prácticas</p>

Unidad de aprendizaje	Tiempo	Objetivo (s) por unidad	Estrategias de Aprendizaje		Medios/recursos de apoyo*	Productos de evaluación
			Individuales	Colaborativas		
<p>PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN.</p> <p>5.1. Revestimiento orgánico e inorgánico.</p> <p>5.2. Protección metálica.</p> <p>5.3. Inhibidores de corrosión.</p> <p>5.4. Protección catódica.</p> <p>5.5. Protección anódica.</p>	9 hrs.	1. Identificar los diferentes métodos de protección contra la corrosión que se utilizan en la vida cotidiana e industria.	<p>Integración de los contenidos del curso en sus propias palabras</p> <p>Repaso y relectura</p> <p>Trabajos extra clase</p> <p>Elaboración de notas durante la clase</p> <p>Organización de la información en esquemas</p> <p>Investigación y Exposición de un tema de la unidad 5.</p>	<p>Mapas conceptuales</p> <p>Organización de la información en esquemas</p>	<p>Pizarrón</p> <p>Acetatos</p> <p>Capítulos de libros</p> <p>Foro de debates de la plataforma virtual.</p> <p>Presentación de Unidad V que se encuentra en la plataforma virtual</p>	<p>Examen escrito</p> <p>Tareas</p> <p>Participaciones</p> <p>Asistencias</p> <p>Orden y limpieza</p> <p>Reportes de Practicas</p> <p>Exposición oral</p>

FORMATO 04: GUÍA DE ESTUDIO

ID

Tema/calendarización	Actividades presenciales	Actividades con el uso de las NTIC
<p>Presentación y Valoración de los integrantes de la asignatura. 1 hr.</p> <p>Presentación del programa de la asignatura 1 hr.</p> <p align="center">1. INTRODUCCIÓN.</p> <p>1.1. Definición 2hr.</p> <p>1.2. Ingeniería de corrosión. 2hr.</p> <p>1.3. Medio ambiente 1hr.</p> <p>1.4. Costos ocasionados por la corrosión. 1hr.</p> <p>1.5. Daños que ocasiona la corrosión. 2 hr.</p>	<p>Desarrollo de la presentación de la primera unidad.</p> <p>Evaluación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Examen escrito • Tareas • Participaciones • Asistencias • Orden y limpieza 	<p>ACTIVIDADES PRELIMINARES</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Conocer y navegar adecuadamente la plataforma virtual, para la comunicación, el envío y la recepción de información. 2. Seleccionar en menú “información del curso”, leer con detenimiento todos los apartados para adquirir y conocer los objetivos, la estructura temática, así como el rol que se debe tomar y cómo se trabajará a lo largo del curso. 3. Leer el mapa conceptual general del curso y el de la primera unidad para conocer el nivel de aprendizaje del curso. <p>Localice en “documentación del curso”, la presentación Unidad I y estúdiela de manera previa a su sesión presencial en la que será explicada por el profesor.</p> <p>ACTIVIDADES DE ESTUDIO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Investigación y Estudio: Definiciones de corrosión y enviarlas a través del “buzón de transferencia digital.” <p>ACTIVIDADES INTEGRADORAS</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. A partir del resumen e introducción de las memorias de la Sociedad Mexicana de Electroquímica en el área de corrosión, identificar: el material, el medio, la importación que los autores le dan a su trabajo, el tipo de daños que ocasionaría el proceso de corrosión. Este material se encuentra en el menú “documentación del curso” de la plataforma virtual. 2. Utilizar “foro de debates” de la plataforma virtual compartiendo sus impresiones de las imágenes que se encuentran en el menú “documentación del curso” de la plataforma virtual. <p>EVALUACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tareas. • Participaciones .

Tema/calendarización	Actividades presenciales	Actividades con el uso de las NTIC
<p style="text-align: center;">2. FUNDAMENTOS</p> <p style="text-align: center;">ELECTROQUÍMICOS.</p> <p>2.1. Reacciones Electroquímicas. 6hr.</p> <p>2.2. Formación de celda. 2hr.</p> <p>2.3. Electrodo mixto. 2hr.</p> <p>2.4. Polarización. 2hr.</p> <p>2.5. Pasivación. 2hr.</p> <p>2.6. Crecimiento de la capa de óxido. 2hr.</p> <p>2.7. Efecto del oxígeno, temperatura y concentración sobre la velocidad de corrosión. 2hr.</p>	<p>Desarrollo de presentación de la segunda unidad.</p> <p>Una práctica de laboratorio.</p> <p>Evaluación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Examen escrito • Tareas • Participaciones • Asistencias • Orden y limpieza • Reportes de Prácticas • Asistencias • Orden y limpieza 	<p>ACTIVIDADES PRELIMINARES</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Leer mapa conceptual, introducción, objetivos y contenidos de la unidad 2 que se encuentra en el menú "documentación del curso" de la plataforma virtual. 2. Localice en documentación del curso, la presentación Unidad II y estúdiela de manera previa a su sesión presencial en la que será explicada por el profesor. 3. Leer práctica 1 de laboratorio que se encuentra en el menú "documentación del curso" de la plataforma virtual. <hr/> <p>ACTIVIDADES DE ESTUDIO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Utilizar "foro de debates" de la plataforma virtual. Participar en el foro de debate del tema 2, como obligatorio cuando menos por una ocasión, ya sea en respuesta a lo solicitado por el profesor o bien compartiendo o disintiendo los aportes de los demás integrantes 2. Investigar en equipo de dos personas como funciona una pila alcalina y enviarla al "buzón de transferencia digital." <hr/> <p>ACTIVIDADES INTEGRADORAS</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Desarrollar el proceso de electrodo de celda (E_{celda}) y enviarlo al "buzón de transferencia digital." <hr/> <p>EVALUACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tareas. • Participaciones.

Tema/calendarización	Actividades presénciales	Actividades con el uso de las NTIC
<p>3. FORMAS DE CORROSIÓN.</p> <p>3.1. Clasificación de la corrosión. 1hr.</p> <p>3.2. Corrosión uniforme. 1hr.</p> <p>3.3. Corrosión galvánica. 2hr.</p> <p>3.4. Corrosión por erosión. 2hr.</p> <p>3.5 Corrosión por socavados. 2hr.</p> <p>3.6 Corrosión por picaduras. 2hr.</p> <p>3.7 Corrosión selectiva. 1hr.</p> <p>3.8. Corrosión intergranular. 1hr.</p> <p>3.9 Corrosión por tensión. 2hr.</p> <p>3.10. Corrosión por fragilización de hidrógeno. 2hr.</p> <p>3.11. Corrosión microbiónológica. 2hr.</p>	<p>Desarrollo de la presentación de la tercera unidad.</p> <p>Seis prácticas de laboratorio</p> <p>Evaluación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Examen escrito • Tareas • Participaciones • Asistencias • Orden y limpieza • Reportes de Prácticas 	<p>ACTIVIDADES PRELIMINARES</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Leer mapa conceptual, introducción, objetivos y contenidos de la unidad 3, así como las prácticas de laboratorio que se encuentra en la sección de documentación del curso. 2. Localice en documentación del curso, la presentación Unidad III y estúdiela de manera previa a su sesión presencial en la que será explicada por el profesor. <p>ACTIVIDADES DE ESTUDIO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Identificar a partir de imágenes localizadas en el material de estudio dentro del menú "Documentación del curso" el deterioro y el tipo de corrosión que presenta un material; Indicar las formas de evitar esta corrosión y enviarlo al buzón de transferencia digital <p>ACTIVIDADES INTEGRADORAS</p> <p>EVALUACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tareas. • Participaciones.

Tema/calendarización	Actividades presenciales	Actividades con el uso de las NTIC
<p>4. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.</p> <p>4.1 Unidades de la velocidad de corrosión 1hr.</p> <p>4.2 Diagramas de Pourbaix. 3hr.</p> <p>4.3 Curvas de polarización. 2hr.</p> <p>4.4 Diagramas de Evans. 1hr.</p> <p>4.5 Medidas de impedancia. 2hr.</p> <p>4.6 Resistencia a la polarización. 1hr</p> <p>4.7 Pruebas de corrosión. 1hr.</p> <p>4.8 Medición de la corrosión en plantas de proceso. 2hr</p>	<p>Desarrollo de la presentación de la cuarta unidad</p> <p>Una práctica de laboratorio</p> <p>Evaluación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Examen escrito • Tareas • Participaciones • Asistencias • Orden y limpieza • Reportes de Prácticas 	<p>ACTIVIDADES PRELIMINARES</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Leer mapa conceptual, introducción, objetivos, contenidos de la unidad 4 y práctica de laboratorio que se encuentra en la sección de documentación del curso 2. Localice en documentación del curso, la presentación Unidad IV y estúdiela de manera previa a su sesión presencial en la que será explicada por el profesor.
		<p>ACTIVIDADES DE ESTUDIO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. A partir de los trabajos de las memorias de congreso localizados en el material de estudio dentro del menú "Documentación del curso" identificar las técnicas que se utilizan para evaluar los daños que ocasionará el proceso de corrosión y mandar esta información al buzón de transferencia digital. 2. Medir la velocidad de corrosión en una unidad de control en la industria, localizadas en el material de estudio dentro del menú "Documentación del curso" y mandar esta información al buzón de transferencia digital.
		<p>ACTIVIDADES INTEGRADORAS</p>
		<p>EVALUACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tareas. • Participaciones.

Tema/calendarización	Actividades presenciales	Actividades con el uso de las NTIC
<p>5. PROTECCION CONTRA LA CORROSION</p> <p>5.1. Revestimiento orgánico e inorgánico. 1hr.</p> <p>5.2. Protección metálica. 2hr.</p> <p>5.3. Inhibidores de corrosión. 1hr.</p> <p>5.4. Protección catódica. 1hr.</p> <p>5.5. Protección anódica. 1hr.</p>	<p>Desarrollo de la presentación de la quinta unidad</p> <p>Evaluación:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Examen escrito • Tareas • Participaciones • Asistencias • Orden y limpieza • Reportes de Prácticas • Exposición oral 	<p>ACTIVIDADES PRELIMINARES</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Leer mapa conceptual, introducción, objetivos y contenidos de la unidad 5 que se encuentra en la sección de documentación del curso. 2. Localice en documentación del curso, la presentación Unidad V y estúdiela de manera previa a su sesión presencial en la que será explicada por el profesor. <p>ACTIVIDADES DE ESTUDIO</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Elegir un método de protección contra la corrosión de esta unidad y realizar una presentación en Power Point® y enviarla vía correo electrónico a todos los integrantes del grupo y también al buzón de transferencia digital para su valoración por parte del profesor. Exponer esta presentación ante el grupo <p>ACTIVIDADES INTEGRADORAS</p> <p>EVALUACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tareas. • Participaciones.

FORMATO 05: ACUERDO DE ACADEMIA.

ACUERDO DE ACADEMIA PARA EL USO DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN Y COMUNICACIÓN EN CLASES PRESENCIALES

La Academia de: Fisicoquímica
del Área Académica de: Materiales y Metalurgia
ha procedido a la adecuación a **formato digital** del programa desarrollado de la Asignatura de: Corrosión y Degradación, correspondiente al Programa Académico Lic. en Ingeniería en Ciencia de los Materiales; y de los contenidos seleccionados (de textos, revistas u otras fuentes de información como lo son referencias bibliográficas localizadas en las bases de datos, Centros de Recursos en Línea de la Biblioteca Digital de la UAEH y en Internet) o materiales propios elaborados para el proceso de Enseñanza y Aprendizaje de dicha asignatura en los que se les ha dado un tratamiento para incorporar el uso de las Nuevas Tecnologías de Información y Comunicación, así como de estrategias de aprendizaje utilizando herramientas del entorno virtual como complemento o apoyo a las sesiones áulicas en el marco del Proyecto Estrategias para Incorporar Elementos de Enfoque Centrados en el Estudiante o en el Aprendizaje a los Planes de Estudio.

Pachuca Hgo., a 22 de Septiembre de 2005

Nombre y firma del docente (s)

Cargo dentro de la Academia
(Presidente, Secretario o miembro)
o bien dentro del Área Académica.

Dr. Guevara Lara Alfredo



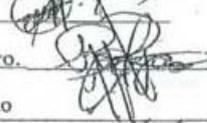
Presidente

Dra. Veloz Rodríguez María Aurora



Secretaria

L. O. Camacho Mendoza Rosa Luz



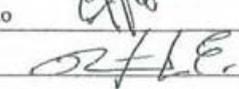
Miembro

M. En C. Roldán Rojas Juan Homero.



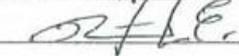
Miembro

Dr. Mendoza Hufzar Luis Humberto



Miembro

Dr. Reyes Cruz Victor Esteban

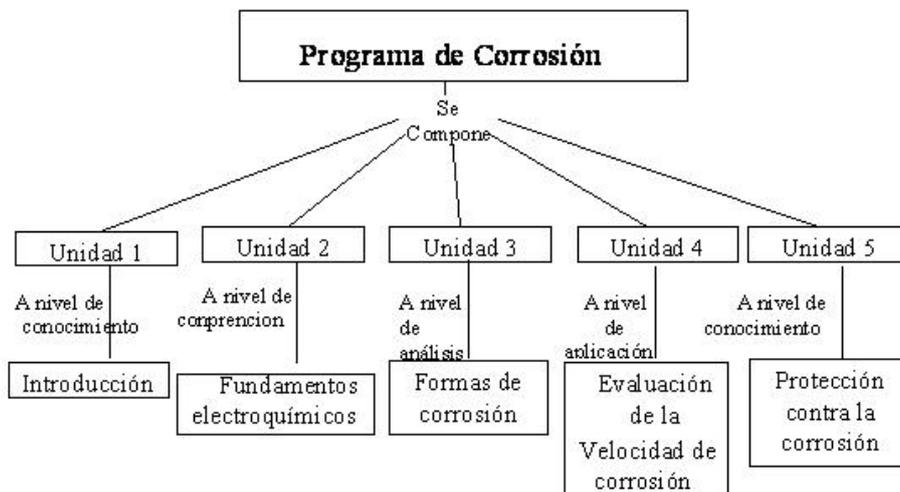


Miembro

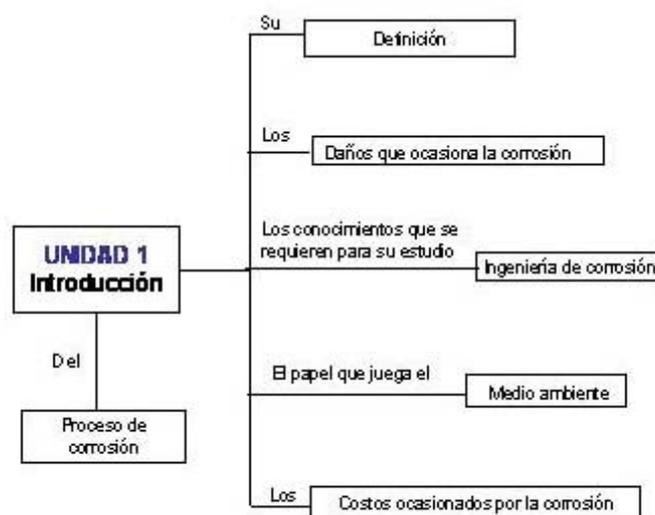
2.2 MAPAS CONCEPTUALES

En el capítulo anterior se definió lo que es un Mapa Conceptual y cómo construirlo, en este apartado se presentan los Mapas Conceptuales elaborados para el programa de estudio en cuestión. Estos también fueron elaborados en Power Point® de forma tal que puedan ser comprendidos rápidamente y sin necesidad de conocer profundamente sobre el tema.

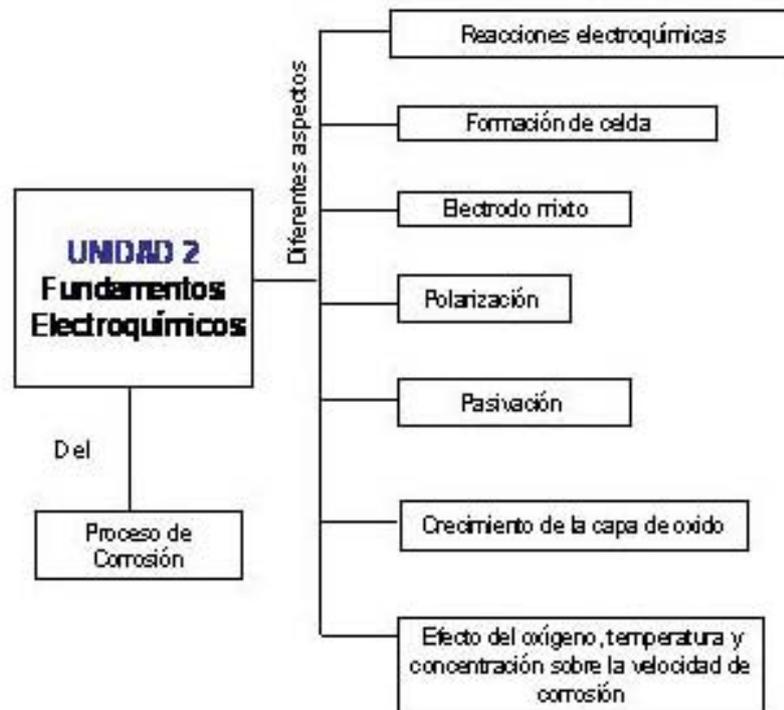
Mapa Conceptual General.



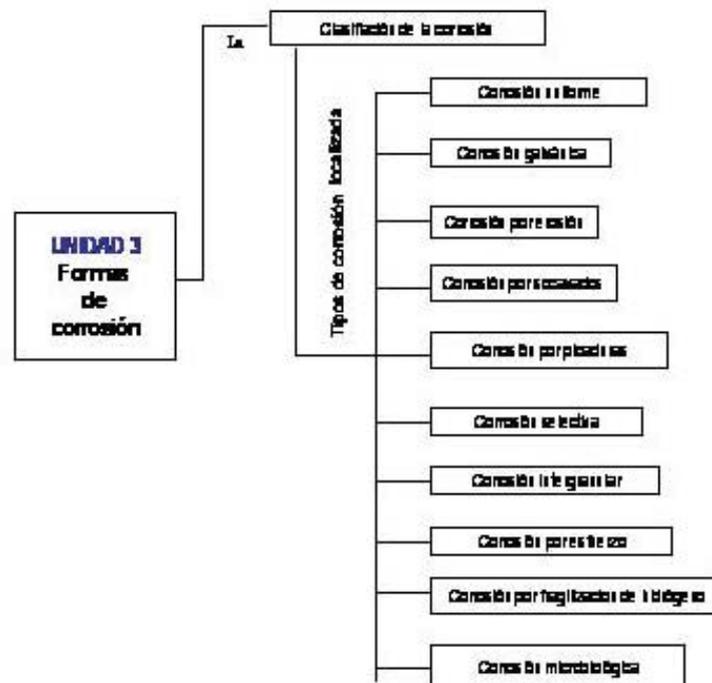
Mapa Conceptual de Unidad I



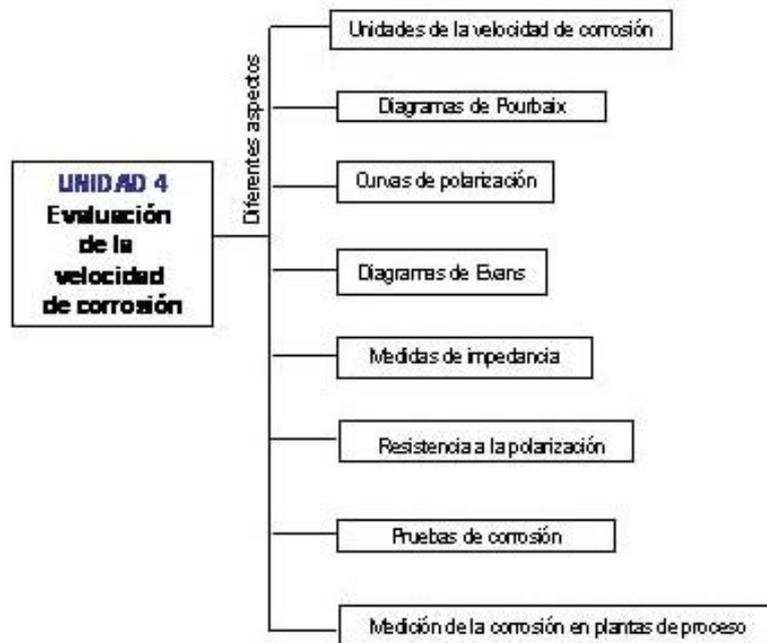
Mapa Conceptual de Unidad II.



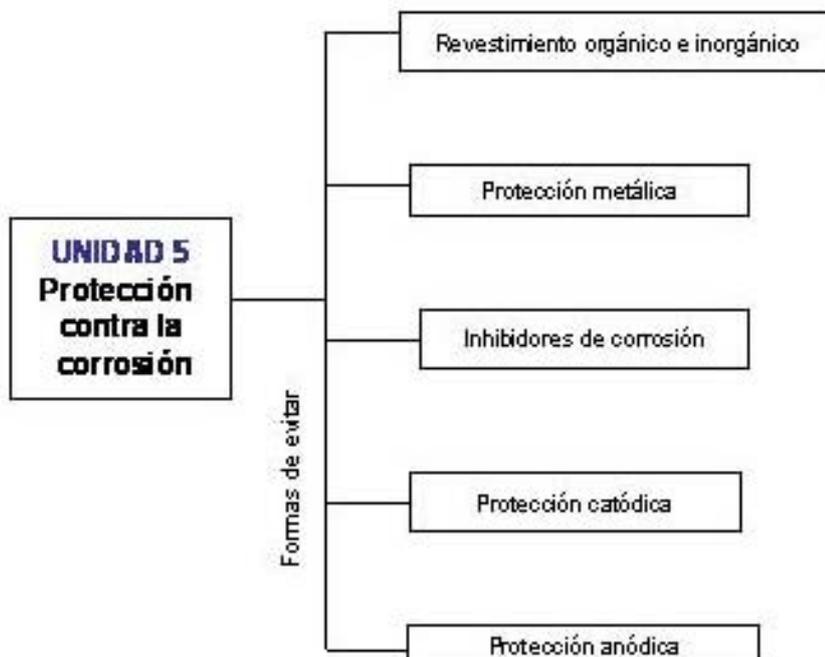
Mapa Conceptual de Unidad III.



Mapa Conceptual de Unidad IV.



Mapa Conceptual de Unidad V.



2.3 CONTENIDOS DE LAS UNIDADES DIDÁCTICAS DE LA ASIGNATURA DE CORROSION Y DEGRADACIÓN.

En el capítulo anterior se dieron a conocer las características para elaborar una Unidad Didáctica y cuales son las partes que la componen, definiendo cada una de ellas, por lo que en esta sección se presentan las Unidades Didácticas desarrolladas para Corrosión y Degradación en el formato solicitado por el Campus Virtual, el cual consta de una introducción, objetivos, orientaciones para el estudio, estructura temática, desarrollo de contenidos y las referencias bibliográficas, para cada una de estas unidades.

El programa de estudio consta de cinco unidades, las cuales son:

Unidad 1. INTRODUCCIÓN.- en esta unidad se define ¿que es la corrosión? y ¿cuáles son los elementos que deben estar presentes para que esta se lleve a cabo?, además de la importancia del estudio de la corrosión en la vida cotidiana y en el ámbito industrial.

Unidad 2. FUNDAMENTOS ELECTROQUÍMICOS.- en esta unidad el alumno aprende a Distinguir los fundamentos electroquímicos que rigen el proceso de corrosión.

Unidad 3. FORMAS DE CORROSIÓN.- aquí se detalla de forma particular cada una de los diferentes formas de corrosión que se pueden presentar, su mecanismo y su control. Interpretación de las tablas de FEM y series Galvánicas como herramientas en el estudio de la corrosión.

Unidad 4. EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.- en esta unidad el alumno aprende a Evaluar la velocidad de corrosión mediante la aplicación de diferentes técnicas, métodos y procedimientos elaborados para este propósito.

Manejar como herramientas los diferentes diagramas (Taffel y Evans) provenientes de las técnicas electroquímicas de polarización que evalúan la corrosión para establecer las condiciones donde se evita o disminuye la corrosión de un material en un ambiente dado.

Unidad 5. PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN. en esta última unidad Identifica los diferentes métodos de protección contra la corrosión que se utilizan en la vida cotidiana e industria.

UNIDAD I. INTRODUCCIÓN A LA CORROSIÓN.

1.1 INTRODUCCIÓN.

Esta primera unidad, contemplada dentro de la asignatura de Corrosión y Degradación, dará paso a comprender la importancia que tiene el estudio de la corrosión en México y en el mundo.

En ella se comenzara por conocer las definiciones de lo que es la corrosión, con la finalidad de tener un marco teórico para las unidades consecuentes, así como para la asignatura posterior a esta.

Para dar comienzo a esta unidad es necesario que el alumno cuente con conocimientos previos de Química General, Fenómenos de transporte, Metálicos I y Metálicos II, los cuales serán utilizados para la correcta comprensión del fenómeno de Corrosión y Degradación que sufren los materiales.

Por otro lado, esta unidad dará cabida a la comprensión de la importancia que tiene el estudio de la corrosión en su carrera y a la aplicación de conceptos que se abordaran en unidades consecuentes, tales como medio ambiente, material, reacción de oxidación, los daños que causa la corrosión daños, etc. Es por ello que al alumno se le pide el pleno dominio de los objetivos planteados en esta unidad.

1.2 OBJETIVOS.

- Definir, ¿Qué es la corrosión? y ¿Cuales son los elementos que deben estar presentes para que esta se lleve a cabo?
- Identificar la importancia del estudio de la corrosión en la vida cotidiana y el ámbito industrial.
- Mencionar las ingenierías que pueden estudiar la corrosión para que ellas den respuesta a las problemáticas que ocasiona este fenómeno en los materiales.

1.3 ORIENTACIONES PARA EL ESTUDIO.

Es importante tomar en cuenta que conocer los elementos que deben estar presentes para que se lleve a cabo la corrosión y degradación de un material, es de gran importancia ya que nos permitirán comprender este fenómeno, el cual ocurre en todos los materiales. Por otra parte, el conocer la importancia del estudio de la corrosión y degradación de un material nos permitirá entender cuales son los daños que puede ocasionar el dejar a un lado este fenómeno.

Finalmente es necesario tener en cuenta cuales son los conocimientos y las actitudes que deben tener los ingenieros que estudien el fenómeno de Corrosión de Degradación de materiales para que puedan dar respuesta a las problemáticas de los daños ocasionados por corrosión.

1.4 ESTRUCTURA TEMÁTICA.

1. Definición.
2. Ingeniería de corrosión.
3. Medio ambiente.
4. Costos ocasionados por la corrosión.
5. Daños por corrosión.

1.5 DESARROLLO DE CONTENIDOS.

1.5.1 DEFINICIONES DE CORROSIÓN

¿Qué es la corrosión? [1]

1.- La destrucción o deterioro de un material debido a la Reacción con el medio ambiente.

2.- Destrucción de materiales por otros medios con mecanismos simples.

1.- Corrosión acuosa.

Reacción con agua (usualmente contiene iones disueltos).

2.- Corrosión a alta temperatura.

Reacción con oxígeno a alta temperatura.

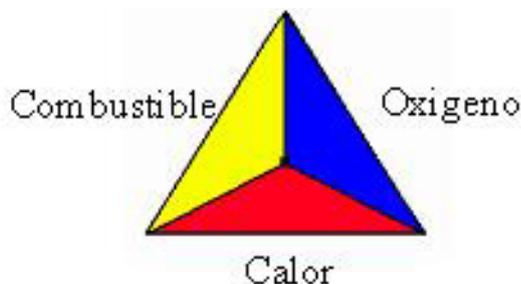
3.- Corrosión a alta temperatura.

Reacción con otros gases.

3.- Metalurgia extractiva inversa (La transformación sufrida por el metal que retorna a su estado original, Proceso de oxidación).

Analogía de combustión y corrosión

Para poder provocar la presencia del fuego es necesario que se reúnan tres elementos: un combustible, 21% de oxígeno y una fuente de ignición o calor. Si uno de ellos no está presente no hay posibilidad de que el fuego exista.



Haciendo una analogía con el fuego, para que la corrosión o degradación de un material exista se debe tener también la presencia de tres elementos los cuales son: un material, un medio ambiente y una reacción que transforme al material.

Ejemplos de Corrosión.

- .. Oxido de Acero.
- .. El producto de corrosión (oxido) es sólido pero no protector.
- .. Reacción de aluminio con agua.
- .. El producto de corrosión es insoluble en agua, por lo que puede ser protector.
- .. Combustión del magnesio en aire.
- .. Oxidación a alta temperatura.

1.5.2 INGENIERÍA DE CORROSIÓN.

¿Qué es la Ingeniería de Corrosión? [1]

Es la aplicación de la ciencia y arte para prevenir o controlar los fenómenos (daños económicos y de seguridad) que ocasiona la corrosión.

Conocimientos que debe tener un Ingeniero en corrosión

- 1.- En el ejercicio y los principios de la corrosión.
- 2.- Química, metalurgia, física y las propiedades mecánicas de los materiales.
- 3.- Pruebas de corrosión.
- 4.- Naturaleza de los ambientes corrosivos.
- 5.- La disponibilidad, fabricación y diseño de materiales.

Estos conocimientos les permitirán dar respuestas al proceso de corrosión que se presenta en su entorno local, regional y profesional.

Atributos que deben tener los Ingeniero en corrosión:

- 1.- Sentido de relaciones humanas.
- 2.- Integridad.
- 3.- Habilidad para pensar y analizar
- 4.- Conciencia de la importancia de la seguridad.
- 5.- Sentido común.
- 6.- Sentido de organización y de primera importancia.
- 7.- Sólida apreciación por lo económico.

Los atributos antes mencionados son necesarios para formar el carácter de inspección de los profesionistas dedicados a estudiar el proceso de Corrosión y Degradación de los materiales expuestos a un medio ambiente.

1.5.3 MEDIO AMBIENTE.

El papel del ambiente en el proceso de la corrosión.

Prácticamente todos los ambientes son corrosivos en algún grado.

- 1.- El aire, la humedad, el fresco, el destilado, la sal y las aguas minerales.
- 2.- Las atmósferas rurales, urbanas e industriales.

- 3.- El vapor y otros gases como el clorhídrico, amoniaco, el sulfuro de hidrógeno, el dióxido de azufre y los gases de combustión.
- 4.- Ácidos minerales como el Hipoclorito, sulfúrico, nítrico.
- 5.- Ácidos orgánicos como Naftenico, acético y fórmico.
- 6.- Solventes vegetales y aceites de petróleo.

En general los materiales inorgánicos son más corrosivos que los orgánicos. Por ejemplo la corrosión en la industria petrolera es debida más al cloruro de sodio, sulfuros, hipoclorito y ácido sulfúrico en agua que al aceite o nafteno o la gasolina.

En muchos procesos químicos industriales las altas temperaturas y presiones han hecho posible que estos sean más eficientes y rápidos. Sin embargo, altas presiones y temperaturas involucran condiciones de corrosión más severas, es por ello que se busca el uso de materiales resistentes a la corrosión.

1.5.4 COSTOS OCASIONADOS POR LA CORROSIÓN.

TABLA 1 Estudios de costos totales de la corrosión de 1949 a 1979 de 9 países [4].

Año	País	Costo en M.D	% PIB
1961	India	320	----
1964	Suecia	58 a 77	----
1965	Finlandia	47a 62	0.58 a 0.77
1969	RFA	6000	3.0
1969	Gran Bretaña	3200	3.5
1973	Australia	550	1.5 a 3.0
1974	URSS	18850	4.1
1975	EUA	70000	4.2
1977	Japón	9200	1.8

El 15%, o sea 10500 M.D (0.6% del PIB de los EUA) pudiera haberse evitado. En general el estudio da como resultado que entre el 20 y el 25% del costo total de la corrosión pudiera haberse evitado, mediante una mejor aplicación de las diferentes técnicas anti-corrosión existentes, y con una mayor toma de conciencia de los riesgos que conlleva la corrosión.

¿Cómo es la situación en México?

En México se han realizado muchos estudios sobre los efectos de la corrosión. A pesar de esto, no se tienen datos precisos de las pérdidas económicas que se generan por este concepto. Sin embargo su impacto es tan amplio que sólo por referir algunos, se relacionan los siguientes:

- Reposición de tuberías y equipos domésticos e industriales.
- Inversiones para su control y prevención.
- Daños a instalaciones marinas y costeras.

- Desgaste de piezas metálicas en automotores.
- Paros de plantas.
- Sobre espesor en el diseño de equipos e instalaciones.
- Pérdida y contaminación de productos.

Ahorro estimado en el tratamiento químico del IMP (Instituto Mexicano del Petróleo) por incorporación del nuevo inhibidor selectivo en base una planta hidrosulfuradora.

Los costos se calcularon tomando como base, una planta de 25,000 barriles por día, dos paros de planta por año, 14 días de paro y un banco de 4 intercambiadores de calor (fuente gerencia de productos químicos).

TABLA 2. Ejemplo de ahorro estimado en el tratamiento químico por incorporación de un nuevo inhibidor en una planta hidrosulfuradora.

CONCEPTO	TRATAMIENTO QUÍMICO		AHORRO TRATAMIENTO ACTUAL \$/AÑO	AHORRO CON NUEVO INHIBIDOR \$/AÑO
	NO	SI		
	COSTO/AÑO	COSTO/AÑO		
COSTO POR PERDIDA DE CAPACIDAD DE PROCESAMIENTO	3'500,000	*1'750,000 (1'400,000)	1'750,000	2'100,000 (350,000)
COSTO POR MANTO Y LIMPIEZA DE INTERCAMBIADORES DE CALOR	400,000	200,000	200,000	200,000
COSTO POR PERDIDA DE PRODUCCION POR PARO DE PLANTA	5'000,000	2'500,000	2'500,000	2'500,000
TOTAL	8'900,000	4'450,000	4'450,000	4'800,000

Consideraciones:

- Los tratamientos químicos IMP en HDS (hidrosulfuradoras) se integran de dos inhibidores de corrosión y un dispersante.
- El costo del inhibidor nuevo será equivalente al de uso actual.
- La dosificación del nuevo inhibidor tiende a ser del 50% menor respecto al actual (10-20 ppm).
- El inhibidor se estima representa el 29% del costo del tratamiento.
- Se tienen 6 refinerías y mínimo tres plantas por refinería (18 plantas de HDS).

En la industria petrolera, la corrosión resulta ser un factor significativo en el incremento de costos de operación de las plantas de refinación de petróleo crudo en:

- Plantas primarias.
- Plantas de hidrosulfuración (gasolina, diesel, turbosina)
- Plantas de cracking catalítico (FCC, TCC)
- Plantas de reformado e isomerización.
- Plantas reductoras de viscosidad.
- Servicios auxiliares (calderas y agua de enfriamiento)

El control de la corrosión es de vital importancia y aunque es un gasto fuerte 6 M\$/año por planta, palidece ante las pérdidas que pudieran presentarse por paros de planta, pérdida de producto, contaminación del producto y baja eficiencia de producción (aprox. 300 M\$/año) , aunado a otros factores ambientales y sociales.

1.5.5 DAÑOS POR CORROSIÓN.

Los daños que puede ocasionar la corrosión son:

- 1.- Económicos (pérdidas directas e indirectas), donde las pérdidas son mucho mayores a las que ocasionan inundaciones, huracanes, incendios y terremotos.
2. Conservación de recursos (agotamiento de las reservas naturales), donde los efectos provocados en los ecosistemas tardan en ocasiones más de 10 años en recuperarse.
3. Seguridad humana (fallos fatales en medios de transporte, corrosión de bidones que contienen residuos radioactivos, escapes en tuberías de refrigeración de plantas nucleares, etc.) con consecuencias muchas veces desastrosas que además de los decesos de las personas ocasionan cambios en la conducta de las comunidades y personas afectadas.

1.5.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Fontana M.G., & Greene N. D. Corrosion Engineering. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- [2] Sastri V. S. (1998). Corrosion inhibitors principles and applications. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Oropeza G. M. T., & Ponce de León A.C.A., González M.I. (2000). Principios y aplicaciones de los procesos electroquímicos. México D.F.: Impresiones y diseño de la UAM-I.
- [4] Javier Ávila M, & Joan Genescá. (1996). Más allá de la Herrumbre. México. Fondo de cultura económica, Colección: L Ciencia desde México, num. 9
- [5] Memorias de XIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (2004). San Luis Potosí, S.L.P, México: Sociedad Mexicana de Electroquímica.
- [6] Proyecto D.328 (2001). Estudio y desarrollo de inhibidores de corrosión usando simulación molecular y técnicas Electroquímicas. México D.F. De La Coordinación de Simulación Molecular del IMP.

UNIDAD II.

FUNDAMENTOS ELECTROQUIMICOS

2.1 INTRODUCCIÓN

La segunda unidad, contemplada dentro de la asignatura de Corrosión y Degradación, dará paso a comprender los fundamentos electroquímicos que rigen el proceso de corrosión y degradación de los materiales.

En ella se comenzara por conocer primeramente lo que es una reacción electroquímica, la termodinámica de la reacción que se lleva a cabo en una interfase y la ley de Nerst con la finalidad de tener las bases para identificar en donde sé esta llevado a cabo el proceso de corrosión de un material.

Por otra parte, esta unidad dará cabida a la comprensión de que celda electroquímica funciona con el principio de la corrosión de un material, el principio de un electrodo mixto, que es la Pasivación y finalmente, los efectos que tiene él oxígeno, la temperatura, la concentración de iones, etc. en el incremento de la corrosión y degradación de un material.

Ante lo expuesto en los párrafos anteriores se le pide al alumno el pleno dominio del objetivo planteado en esta unidad.

2.2 OBJETIVO.

1.- Distinguir los fundamentos electroquímicos que rigen el proceso de corrosión.

2.3 ORIENTACIONES PARA EL ESTUDIO.

Es importante que tomes en cuenta que conocer los principios y elementos electroquímicos que rigen el proceso de la corrosión y degradación de un material es de gran importancia ya que nos permitirán distinguirlo de otros procesos interfaciales que no involucran la corrosión y degradación de un material. Por otra parte, el conocer los principios electroquímicos que rigen el proceso de corrosión nos permitirá entender el mecanismo que se lleva a cabo en el proceso de corrosión y al poder de esta forma modificarlo para alargar la vida útil de un material que esta expuesto a un medio ambiente determinado. Finalmente es necesario tener en cuenta como se modifica la velocidad de corrosión en un material al cambiar la concentración de oxígeno, hidrógeno, temperatura, cambios hidrodinámicos de medio ambiente, etc.

2.4 ESTRUCTURA TEMÁTICA

1. Reacciones electroquímicas de oxidación.
2. Formación de celda.
3. Electrodo mixto.
4. Polarización.
5. Pasivación.
6. Crecimiento de la capa de oxido.
7. Efecto del oxígeno, temperatura y concentración sobre la velocidad de corrosión.

2.5 DESARROLLO DE CONTENIDOS.

2.5.1 REACCIONES ELECTROQUÍMICAS DE OXIDACIÓN [3].

Una de las definiciones de corrosión es la metalurgia inversa (reacción de oxidación), es por ello que para entender este fenómeno es necesario conocer la reacción electroquímica de oxidación.

Partiendo de que las reacciones electroquímicas son reacciones químicas heterogéneas que ocurren vía transferencia a través de la interfase electrodo (material) y un electrolito (medio ambiente) y de que los procesos parciales se llevan a cabo independientemente, cada uno en su propio electrodo se tiene:

Que en la reacción de reducción, se requiere de electrones para llevarse a cabo:

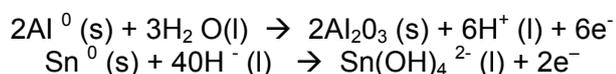


Mientras que la Reacción de Oxidación produce electrones.



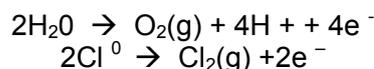
La naturaleza y alcance de las reacciones electroquímicas de oxidación pueden tener varias características como se muestran a continuación:

1. Aquellas donde están implicadas fases gaseosas, líquidas y sólidas y las reacciones de oxidación resultan a menudo en cambios de fase, por ejemplo:

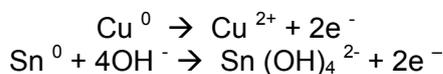


2. Procesos interfaciales comunes anódicos que incluyen:

♦ Desprendimiento de gas, por ejemplo:



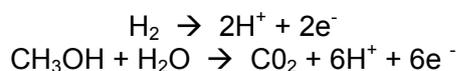
♦ Disolución de metal, por ejemplo:



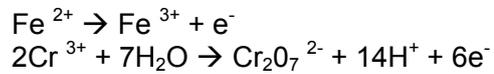
♦ Transformación de una fase presente en la superficie, por ejemplo:



♦ Oxidación de un combustible, por ejemplo:



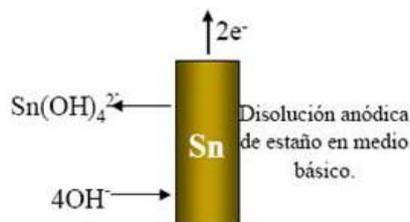
♦ Un cambio en el estado de oxidación de un metal en disolución, por ejemplo:



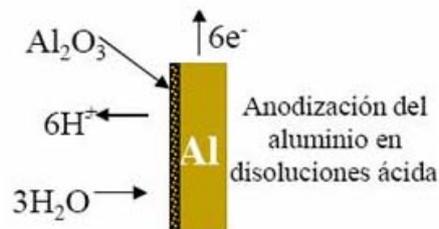
Debe quedar ya claro que las reacciones electroquímicas de oxidación pueden implicar una amplia variedad de especies, un rango diverso de química y muy diferentes tipos de materiales. Sin embargo, aunque el proceso de la corrosión se considera como una reacción de oxidación “No toda oxidación es un proceso de corrosión”.

Los procesos de corrosión pueden ser:

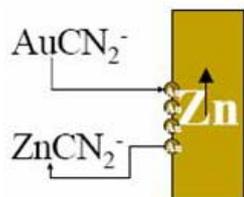
1. La disolución del metal



2.- Transformaciones de fases en la superficie.



3.- La cementación.



Para entender realmente el proceso de la corrosión es necesario entender el funcionamiento de una celda electroquímica y la termodinámica de ésta.

2.5.2 FORMACIÓN DE CELDAS [3]

Los componentes mínimos requeridos para una celda electroquímica (y por lo tanto una reacción de celda) son un ánodo, un cátodo, contacto iónico entre los electrodos (vía un electrolito), y un contacto electrónico entre ellos, es decir, un circuito eléctrico externo como se muestra en la siguiente figura.

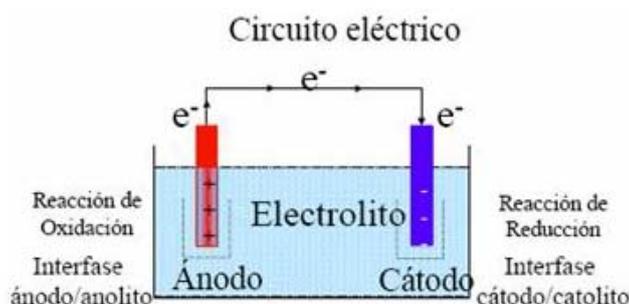


Fig. 4 Celda electroquímica.

Los electrodos son normalmente buenos conductores electrónicos. Al igual que el circuito eléctrico externo, presentan poca resistencia al flujo de electrones. Normalmente, los electrodos son metales sólidos o carbón, aunque también es posible utilizar un amplio rango de otros materiales, incluyendo polímeros conductores y cerámicos conductores. Los electrodos también pueden ser semiconductores que se pueden considerar que conducen a través del movimiento de los huecos electrónico.

El electrolito es normalmente un conductor iónico efectivo tal como una disolución acuosa de una sal, de un ácido o de una base. Otras posibilidades incluyen disolventes no acuosos tales como acetonitrilo o metanol (a los que se adiciona un electrolito soporte inerte), junto con sales fundidas, polímeros iónicamente conductores y cerámicos conductores.

El circuito eléctrico en una celda electroquímica se puede dividir convenientemente en dos partes. El circuito eléctrico externo, la corriente, i , fluye en una dirección, desde el ánodo hacia el cátodo como un flujo de electrones. Dentro de la celda, la corriente fluye electrónicamente dentro de la estructura del electrodo e iónicamente a través del electrolito situado entre ellos. El electrolito, la corriente fluye mediante los dos caminos de migración de los iones, los aniones moviéndose hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo.

El cátodo es el electrodo sobre el que tiene lugar la reducción de las especies mediante ganancia de electrones desde el electrodo. Por convenio, se coloca en la parte derecha de la celda en línea con la regla nemotécnica "Reduction on the Right". El ánodo es el electrodo sobre el que tiene lugar la oxidación de las especies por pérdida del electrón hacia el electrodo.

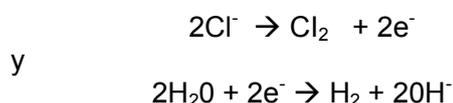
Es importante darse cuenta que existe un balance de carga a través de una celda electroquímica de tal forma (i) la corriente total para la reducción en el cátodo es igual que para la oxidación en el ánodo y (ii) no puede haber un crecimiento localizado de carga debido a la reacción electroquímica.

TIPO DE CELDAS ELECTROQUÍMICAS:

Celdas Electrolíticas

Las celdas electrolíticas o inducidas requieren una entrada de energía eléctrica (a través de una fuente de corriente continua o una batería) para producir transformaciones químicas en las interfaces de los electrodos. Tales celdas tienen un **potencial de celda** (E_{cel}) de equilibrio **negativo** y un valor positivo para la variación de energía libre de Gibbs. Se fuerza al cátodo a tener un potencial negativo con respecto al ánodo conectando el cátodo al terminal negativo de la fuente de potencia.

En la mayoría de los casos, una reacción deseada tiene lugar en uno de los electrodos y la otra reacción electroquímica es no productiva, o sirve sólo para mantener un pH constante. Hay varias excepciones, de todas formas, una de las más importantes, la célula clorosa. Esta celda produce tres productos: cloro en el ánodo, hidrógeno en el cátodo e iones hidroxilos en el electrolito mediante las reacciones:

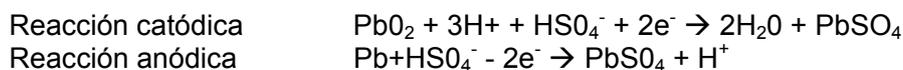


Este es un ejemplo de una electrosíntesis "acoplada", es decir, ambos electrodos producen productos útiles.

Celdas Galvánicas.

En contraste con las celdas electrolíticas, la celda electroquímica espontánea (Galvánica), tiene un valor **positivo** de E_{cel} y tendrá por lo tanto $E_c > E_a$, es decir, el cátodo será positivo respecto al ánodo. Este es el caso con todas las celdas espontáneas incluyendo las baterías, pilas de combustibles, celdas de corrosión y celdas de cementación (desplazamiento de metal).

Como un ejemplo de celda espontánea, se puede considerar la batería plomo-ácido descargando. Esta celda tiene las siguientes reacciones electroquímicas:



Estas reacciones de "semi-celda" están ajustadas, es decir, son escritas con el mismo número de electrones (el número de carga). Su adición da la reacción de celda que es un proceso redox:



Si la celda plomo-ácido opera bajo condiciones estándar, el potencial de celda estándar, E_{CEL} se puede calcular a partir de valores conocidos de los potenciales de electrodo estándar.

$$E_{cel}^{\circ} = E_{PbO_2/PbSO_4}^{\circ} - E_{Pb/PbSO_4}^{\circ}$$
$$E_{cel}^{\circ} = 1.68 V - (-0.36) V = 2.06 V$$

El gran valor positivo significa una reacción de celda espontánea que tiene una fuerza conductora alta. Otro ejemplo de una celda espontánea es la pila de combustible H_2/O_2 . En este caso, se utilizan electrodos porosos y las reacciones son como sigue:



Es importante señalar que la corrosión es un proceso espontáneo pero **No toda celda galvánica** está involucrada con el deterioro y destrucción de un material al estar expuesta a un medio ambiente determinado (**proceso de corrosión**), tal como se observa lo muestra la pila de combustible H_2/O_2 .

Termodinámica de las celdas electroquímicas [3].

Relación entre G (energía libre de Gibbs) y E.

A temperatura y presión constante

$$* \Delta U = q - W$$

Donde:

$$W = W_m + W_e$$

Considerando un sistema completamente reversible, el trabajo mecánico a temperatura y presión constante es:

$$W_m = -P\Delta V$$

Además de la segunda ley de la termodinámica tenemos

$$q = T\Delta S$$

La energía libre de Gibbs, a temperatura y presión constante

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Donde:

$$** \Delta H = \Delta U + P\Delta V$$

Combinando las ecuaciones (*) a (**) se tiene:

$$\Delta G = -W_e$$

$$W_e = nFE$$

$$\Delta G = -nFE$$

Criterio de espontaneidad para procesos a presión constante involucran el ΔG .

$\Delta G < 0$	$E > 0$	Espontánea.
$\Delta G > 0$	$E < 0$	No espontánea.
$\Delta G = 0$	$E = 0$	Equilibrio.

Es muy importante remarcar que un potencial E se entiende como una diferencia de capacidades de movimiento de una especie cargada en dos medios diferentes, generalmente uno conductor electrónico y otro conductor iónico (electrolito). Por lo anterior, es posible hablar de diferencias de potenciales en diversos lugares de una celda electroquímica, una en el ánodo E_a , otra en el cátodo E_c y finalmente una la celda E_{cel}

$$(E_{cel} = E_c - E_a, E_{cel} = E_{Derecha} - E_{Izquierda}).$$

Si se analiza un proceso electroquímico como se haría para una transformación química, se puede llegar al origen de las diferencias de potencial en un electrodo, así como el significado del potencial medido en una celda. Se sabe que el cambio de la energía libre de Gibbs para una reacción química se define como una diferencia entre los potenciales químicos de los productos y los potenciales químicos de los reactivos, es decir [3]:

$$\Delta G = \sum_{\text{productos}} n_i \mu_i - \sum_{\text{reactivos}} n_i \mu_i$$

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i$$

Donde:

μ_i - Potencial Químico.

μ_i^0 - potencial Electroquímico.

a_i - actividades de las especies en el conducto iónico.

n - coeficiente estequiométrico de la reacción.

Exportando este concepto a una reacción electroquímica, con la diferencia de que ahora se tendrá que hablar de diferencia de potencial de potenciales electroquímicos de productos y de reactivos en una reacción de electrodo, o bien de una celda completa.

$$\Delta G = \sum_{\text{productos}} n_i \bar{\mu}_i - \sum_{\text{reactivos}} n_i \bar{\mu}_i$$

$$\bar{\mu}_i = \mu_i + Z \cdot F \cdot \psi$$

Donde:

$\bar{\mu}_i$ - Potencial Electroquímico.

Z - Numero de carga incluyendo el signo.

F - Constante de Faraday.

ψ - Potencial eléctrico de la fase.

i - Especies oxidada, especie reducida y e^- .

Desarrollo del proceso de electrodo catódico $E_c = ?$



$$\Delta G = \sum 1 [\mu_{R^{(m-n)+}}] - \sum [1 \mu_{O^{m+}} + n \mu_{e^-}]$$

$$\Delta G = [\mu_{R^{(m-n)+}} + (m-n) F \psi^{sol} - \mu_{O^{m+}} - m F \psi^{sol} - n \mu_{e^-} + n F \psi^M] = 0$$

Si consideramos que no hay electrones y estamos en equilibrio:

$$\Delta G = \mu_{R^{(m-n)+}} - \mu_{O^{m+}} + n F (\psi^M - \psi^{sol}) = 0$$

$$nF(\psi^M - \psi^{sol}) = \mu_{O^{m+}} - \mu_{R^{(m-n)+}}$$

$$\psi^M - \psi^{sol} = \frac{\mu_{O^{m+}}^0 + RT \ln a_{O^{m+}} - \mu_{R^{(m-n)+}}^0 - RT \ln a_{R^{(m-n)+}}}{nF}$$

$$\psi^M - \psi^{sol} = \left[\frac{\mu_{O^{m+}}^0 - \mu_{R^{(m-n)+}}^0}{nF} \right] + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{O^{m+}}}{a_{R^{(m-n)+}}}$$

$$E_c = E_{O^{m+}/R^{(m-n)+}}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{O^{m+}}}{a_{R^{(m-n)+}}}$$

Esta ecuación se conoce como ley de Nerst y su validez está limitada a la existencia de una interfase donde las actividades de las especies son $a_{O^{m+}}$ y $a_{R^{(m-n)+}}$.

Desarrollo del proceso de electrodo anódico $E_a =$

$$R^{(m-n)+} \rightarrow O^{m+} + ne^-$$

$$\Delta G = \sum [1\mu_{O^{m+}} + n\mu_{e^-}] - \sum 1[\mu_{R^{(m-n)+}}]$$

$$\Delta G = [\mu_{O^{m+}} + mF\psi^{sol} + n\mu_{e^-} - nF\psi^M - \mu_{R^{(m-n)+}} - (m-n)F\psi^{sol}] = 0$$

$$\Delta G = \mu_{O^{m+}} - \mu_{R^{(m-n)+}} + nF(\psi^{sol} - \psi^M) = 0$$

$$\psi^{sol} - \psi^M = \frac{\mu_{R^{(m-n)+}}^0 + RT \ln a_{R^{(m-n)+}} - \mu_{O^{m+}}^0 - RT \ln a_{O^{m+}}}{nF}$$

Al cambiar el signo del proceso de electrodo anódico se obtiene la misma expresión del proceso de electrodo catódico.

$$E_a = -E_c$$

¿Cómo se mide el potencial E para cada proceso de celda?

Como se muestra en la figura de abajo, el potencial de electrodo de interés (electrodo de trabajo) se mide con respecto a un electrodo de referencia, teniendo el último un potencial reproducible y bien establecido independientemente de la densidad de corriente.

El potencial de electrodo E (anódico o catódico) se mide como la diferencia de potencial entre los electrodos de trabajo y de referencia:

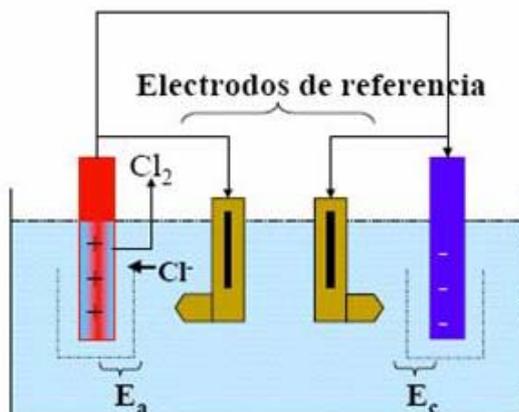
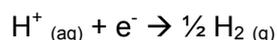


Fig. 5 Medición del potencial de electrodo.

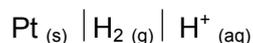
$$E = E_{ET} - E_{ER}$$

Se supone que el potencial de electrodo de referencia es constante y por lo tanto cualquier cambio en el valor medido, E (anódico ó catódico), se debe a cambios en el potencial de electrodo del trabajo (ánodo ó cátodo). El instrumento para medir el potencial de electrodo debe tener una alta impedancia con el objetivo de que no circule una comente significativa a través del electrodo de referencia (que cambiaría el potencial del último) y presenta una suficiente exactitud y precisión para medir un amplio rango de potenciales dentro de ± 0.1 mV. El aparato más habitual es un voltímetro digital (vmd), aunque a veces también se utilizan osciloscopios y microordenadores, registradores o sistemas de datos.

El electrodo de referencia principal es el electrodo de hidrógeno que soporta el equilibrio dinámico.



Esta reacción reversible normalmente se establece sobre una superficie catalítica especialmente preparada de "negro de platino", es decir un electrodeposito de gran área dispersado de partículas de platino sobre un substrato de lámina de platino. Los protones acuosos se aportan normalmente mediante una disolución de ácido clorhídrico (u ocasionalmente ácido sulfúrico). El electrodo se puede representar esquemáticamente utilizando una notación corta.



Donde, las líneas continuas verticales indican límites de fase entre las especies. Bajo condiciones estándar, es decir, materiales puros en sus estados estándar, una presión de hidrógeno de 1 atmósfera y una actividad de protón de 1, el potencial del electrodo de hidrógeno estándar (EHS) es, por convenio, cero a todas las temperaturas, es decir

$$E^0_{ENH} = 0 \text{ V}_a \text{ todas las temperaturas}$$

No es el potencial de electrodo estándar catódico (E_c), se encuentra utilizando una celda que contiene el electrodo de interés en la parte derecha y el EHS en la izquierda. Entonces

$$E^0 = E_{ET}^0 - E_{ENH}^0,$$

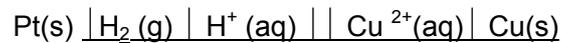
Que es como si se midiera un potencial de celda en condiciones estándar

$$E_{cel}^0 = E_{Derecha}^0 - E_{Izquierda}^0 \quad \text{ó} \quad E_{cel}^0 = E_c^0 - E_a^0$$

ya que el

$$E_{ENH}^0 = 0 \text{ V} \quad \text{el} \quad E_{cel}^0 = E_c^0$$

Por ejemplo, el potencial de electrodo estándar E_{0c} del electrodo de $\text{Cu}^{2+} / \text{Cu}_0$ se mide en la semicelda:



Como +0.34 V. La barra doble vertical representa una unión líquida, es decir, la fase límite entre los dos electrolitos diferentes. En general, es importante eliminar uniones Líquidas ya que ellas implican una diferencia de potencial. Alternativamente, sus diferencias de potencial se deberían minimizar y estabilizar mientras se establecen las disoluciones de unión líquida.

En la práctica, el EHS se utiliza raramente debido a las dificultades prácticas en construirlo y reproducirlo. Más bien, se utiliza un electrodo de referencia secundario robusto y práctico. La elección de un electrodo de referencia dependerá de la aplicación y normalmente se selecciona un electrodo de referencia sobre la base de la compatibilidad con el sistema estudiado, es decir, un anión común.

Las elecciones típicas son el calomelanos (mercurio/cloruro mercurioso/cloruro) mercurio/sulfato mercurioso/sulfatos, plata/cloruro de plata o cobre/sulfato de cobre (siendo el último un seudo electrodo de referencia).

La tabla de FEM que se muestra continuación contiene los potenciales de electrodo estándar para diferentes sistemas, en el cual se puede determinar el carácter oxidante o reductor de una reacción de electrodo. Las reacciones se representan como proceso de reducción, por lo que al descender en la clasificación disminuye el poder reductor y aumenta el poder oxidante. Con estos antecedentes y tomando en cuenta que $E_a = -E_c$, esta tabla nos puede indicar la espontaneidad (valor positivo de $E_{0cel} = E_{0a}$) de un proceso de oxidación de un metal en presencia con sus iones (Proceso de corrosión) en condiciones estándar.

En caso de no tener condiciones estándar se debe utilizar el potencial de electrodo anódico para determinar si un material expuesto a diferentes concentraciones de sus iones y temperatura presenta un proceso espontáneo de oxidación (corrosión).

$$E_a = E_{R^{(m-n)+}/O^{m+}}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{R^{(m-n)+}}}{a_{O^{m+}}}$$

En la tabla de FEM los potenciales de electrodo E_c que tiene los valores positivos son los metales nobles o catódicos mientras que los de valor negativo son los metales activos o anódicos.

TABLA 3 Potenciales de electrodos estándar a 25 °C, 1atm de presión [3].

Reacción electrodródica	E° (V)
$K^+ + e^- = K$	-2.925
$Al^{3+} + 3e^- = Al$	-1.660
$H_2O + 2e^- = H_2 + 2OH^-$	-0.828
$Zn^{2+} + 2e^- = Zn$	-0.763
$Ag_2S + 2e^- = 2Ag + S^{2-}$	-0.690
$Fe^{2+} + 2e^- = Fe$	-0.440
$Ag(CN)_2^- + e^- = Ag + 2CN^-$	-0.310
$Pb^{2+} + 2e^- = Pb$	-0.126
$Fe^{3+} + 3e^- = Fe$	-0.036
$2H^+ + 2e^- = H_2$	0.000
$AgCl + e^- = Ag + Cl^-$	+0.222
$Hg_2Cl_2 + 2e^- = Hg + 2Cl^-$	+0.267
$Cu^{2+} + 2e^- = Cu$	+0.337
$Ag(NH_3)_2^+ + e^- = Ag + 2NH_3$	+0.373
$Hg_2SO_4 + 2e^- = 2Hg + (SO_4)^{2-}$	+0.615
$Ag^+ + e^- = Ag$	+0.799
$O_2 + 4H^+ + 4e^- = 2H_2O$	+1.229

Otra forma de conocer si un proceso de oxidación es espontáneo es a través de la tabla de series galvánicas, la cual esta referida a un medio de agua de mar. Esta tabla proporciona información cualitativa del comportamiento anódico y catódico de un metal o una aleación, está se muestra a continuación comparándola con la tabla de FEM.

TABLA 4 Series estándares de FEM y series galvanicas de algunos metales comerciales y aleaciones en agua de mar [1].

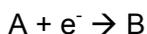
	Reacción	E° a 25°C V vs NHE	
↑ Noble ó Catódico	$Au - Au^{+3}$	+1.498	↑ Noble ó Catódico
	$Pt - Pt^{+2}$	+1.2	
	$Ag - Ag^+$	+0.799	
	$Hg - Hg_2^{+2}$	+0.788	
	$Cu - Cu^{+2}$	+0.337	
	$H_2 - H^+$	0.000	
↓ Activo ó Anódico	$Pb - Pb^{+2}$	-0.126	↓ Activo ó Anódico
	$Ni - Ni^{+2}$	-0.250	
	$Co - Co^{+2}$	-0.277	
	$Cd - Cd^{+2}$	-0.403	
	$Fe - Fe^{+2}$	-0.440	
	$Cr - Cr^{+3}$	-0.744	
	$Zn - Zn^{+2}$	-0.763	
	$Al - Al^{+3}$	-1.662	
	$Mg - Mg^{+2}$	-2.363	
	$Na - Na^+$	-2.714	
$K - K^+$	-2.925		

2.5.3 ELECTRODO MIXTO A CIRCUITO ABIERTO.

Hasta aquí las celdas electroquímicas espontáneas consideradas han contenido electrodos separados y claramente identificables. Hay varios ejemplos, de todas formas, cuando una superficie conductora esta en contacto con un electrolito que contienen especies que soportan tanto la oxidación como la reducción simultáneamente (Un electrodo mixto es aquel que puede tener ambas cargas). Esta situación se puede ilustrar considerando el caso general donde la reacción química global:



Tiene lugar vía las reacciones electroquímicas



Y



La superficie del "electrodo mixto" que sostiene el proceso redox debe permanecer catalítica y, ya que no puede retener carga neta, las velocidades de las dos reacciones de transferencia electrónica catódica y anódica deben ser iguales.

Como con todas las reacciones espontáneas, sólo tendrá lugar si tiene una energía libre de Gibbs negativa asociada a ella. Una reacción superficial de este tipo (**Electrodo mixto**) sólo tendrá lugar prioritariamente a una reacción redox en fase disolución si el material electrodo es catalítico o de hecho, si toma parte activamente en la reacción. La corrosión de metales (por reacción con el oxígeno disuelto, protones o agua) es un ejemplo de este tipo de reacción.

Superficie uniforme

En principio, la superficie conductora puede ser completamente uniforme; en este caso, los sitios anódicos y catódicos estarán íntimamente mezclados e indistinguibles, uno del otro y variantes con el tiempo. En la práctica es más habitual para las reacciones anódica y catódica que estas tengan lugar sobre diferentes tipos de sitios que se pueden identificar, aunque quizás sólo a escala microscópica. Estas diferencias en las zonas superficiales pueden aparecer por diferentes rutas.

Sitios naturales: imperfecciones cristalinas en los bordes del cristal que puedan existir.

Podría ser un defecto ocasionado sobre la superficie: tal como los arañazos en una película de pintura protectora o película de óxido.

Los sitios se pueden desarrollar como una consecuencia de una reacción electroquímica: como en el caso del desarrollo de agujeros durante la corrosión o la reacción de núcleos durante el recubrimiento de metal por electroless.

La actividad superficial puede variar debido al recubrimiento parcial mediante, por ejemplo: un adsorbato orgánico, hidrógeno adsorbido o una película de óxido.

Varias reacciones de celdas de oxidación electroquímica sobre superficies simples son importantes en muchos aspectos de la tecnología industrial, como se muestra mediante los siguientes ejemplos:

♦ La corrosión de una superficie metálica simple se entiende normalmente considerando que la superficie se subdivide en zonas catódicas y anódicas. El caso de corrosión del hierro vía reducción del oxígeno, en un electrolito acuoso, casi neutro, aireado. En este caso, la propia superficie metálica es el reactivo anódico mientras que el oxígeno disuelto proporciona el reactivo catódico.

♦ Cementación (es decir el desplazamiento de un metal de la disolución por otro) se utiliza ocasionalmente como un método de deposición de metal y, particularmente, se utiliza rutinariamente para extraer metales siguiendo operaciones mineras. Por ejemplo, la adición de zinc en polvo a un líquido que contiene cadmio da como resultado la extracción del cadmio vía la disolución del zinc. En este caso, es importante maximizar el área de sitios de reacción utilizando pequeñas partículas de zinc y agitando el electrolito (o moviendo las partículas de metal) que mejora el transporte de materia de las especies y expone continuamente también reactivo de zinc fresco.

2.5.4 POLARIZACIÓN [1].

La polarización es el flujo de e^- que propicia que los potenciales del electrodo E en equilibrio de cada fase se desvíe de su valor inicial. E en otras palabras, es el desplazamiento de un potencial de equilibrio hacia otro por medio de una corriente eléctrica.

Para entender este concepto se analiza el siguiente ejemplo del Equilibrio del:



La termodinámica aplicada a procesos de corrosión puede ser usada a través de reacciones en equilibrio para determinar si el proceso puede o no puede ocurrir. Sise demuestra que la reacción es posible, la termodinámica no dará, sin embargo, ninguna idea acerca de la velocidad de la reacción. Para predecir la velocidad a la cual el metal se va a corroer necesitamos incluir factores cinéticos. A final de cuentas, lo que buscaremos de la cinética es que nos diga qué cantidad de metal por unidad de tiempo se está disolviendo en un medio dado, cuando este sistema esté desplazado de una situación de equilibrio. Para introducirnos al mundo de la cinética de corrosión debemos olvidarnos por un momento de la corrosión y pensar en un metal que no se corroe cuando se le sumerge en cierto electrolito.

Pensemos que ese metal sea el cobre y que esté sumergido en una solución conteniendo iones cobre. La solución no contiene oxígeno disuelto. Bajo estas condiciones nuestra pieza de cobre no se corroerá. Esto se debe fundamental mente a que el cobre es mucho más noble que la reacción de desprendimiento de hidrógeno según lo indica la Tabla de la Fuerza Electromotriz, $E_{\text{Cu}} > E_{\text{H}}$. Aparte del hidrógeno iónico no existe otro reactivo más catódico en ese medio, por lo tanto decimos que el cobre establece un equilibrio del tipo:



Que ocurre precisamente al potencial relativo estándar $E^0_{Cu^{2+}/Cu^0}$ establecido anteriormente.

Al decir que la pieza de cobre no se corroe cuando está en contacto con una disolución de sus propios iones, queremos expresar que no hay una transformación química neta. Sin embargo, debemos dejar muy claramente establecido que aun cuando el sistema se encuentre en equilibrio, éste no es estático sino dinámico. Al potencial E^0 , existen reacciones de oxidación por las cuales se disuelve cobre, y también reacciones de reducción en donde cobre en solución se deposita como metal. Estas reacciones ocurren de continuo y simultáneamente, siendo iguales en la magnitud de la carga transferida, aunque en sentido contrario. La velocidad con que se disuelve el cobre de la pieza es igual a la velocidad con que el cobre en solución se deposita. En resumen, en el equilibrio dinámico E^0 , no existe flujo de electrones ni, por lo tanto, transformación química neta.

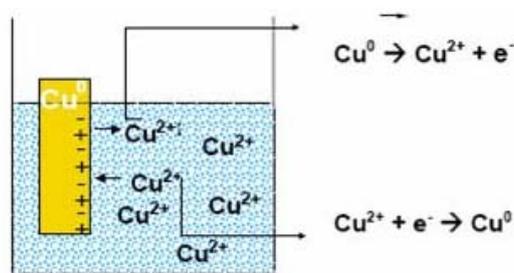


Fig. 6 Ejemplo de polarización.

En electroquímica, a este flujo de electrones generados en la reacción de disolución(oxidación), el cual es igual al flujo de electrones consumidos en la reacción de reducción, se le llama densidad de corriente de intercambio i_0 , siendo una característica de un metal en equilibrio. Cada interfase tendrá una i_0 característica y su magnitud refleja la facilidad que posee esa interfase metal/solución para soltar y aceptar electrones.

Por supuesto, como las velocidades de oxidación y de reducción son iguales en magnitud pero de signo opuesto, no habrá un flujo de electrones *neto* y, por lo tanto, será imposible medir la i_0 en un instrumento. Si la corriente anódica (de oxidación) se representa por $i_{anódica}$ y la corriente catódica (de reducción) como $i_{catódica}$, en el equilibrio

$$i_{anódica} = i_{catódica} = i_0$$

Cualquier desviación que haya de la condición de equilibrio, desplazará el potencial del electrodo y entonces modificará las magnitudes de las velocidades anódicas y catódicas, produciéndose un flujo neto de electrones.

Supongamos que nuestra pieza de cobre, inicialmente en equilibrio con sus propios iones, se conecta a una laminilla de platino sumergida en el mismo electrolito a través de una fuente de poder. Si asumimos que al manipular la fuente de poder podemos establecer una diferencia de potencial entre el cobre y el platino que haga fluir electrones entre estos metales, entonces se estarán modificando las condiciones de equilibrio reinantes en cada una de las interfases del cobre y del platino.

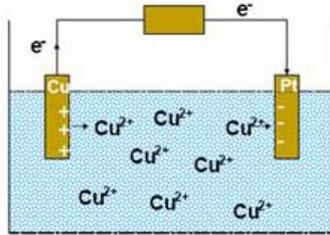


Fig. 7 Polarización.

La diferencia de potencial impuesta por la fuente propicia que el cobre se disuelva, actuando éste como ánodo, pasando a solución como iones cobre Cu^{2+} . Habrá entonces un flujo de electrones generados que viajarán hacia el platino (que actuará entonces como cátodo) a través de las conexiones eléctricas. El flujo de electrones ha propiciado que los potenciales de equilibrio de cada una de las interfases se desvíen de su valor inicial. Esto es lo que precisamente significa el término **Polarización**, el desplazamiento de un potencial de equilibrio hacia otro valor por medio de un flujo de corriente eléctrica.

En la interfase cobre/solución se dejará sentir pues, un incremento en la velocidad de oxidación del cobre. Las viejas condiciones de equilibrio han desaparecido para dar cabida a nuevas situaciones al no equilibrio. En la lámina de cobre, la magnitud de la corriente indicará el grado en que la velocidad de oxidación, por decir algo, excederá a la reducción. Es decir, nos dará una indicación de la *corriente neta* del proceso. La velocidad neta del proceso de oxidación o anódico estará dada por [4]:

$$i_a(\text{neta}) = i_{\text{catódica}} - i_{\text{anódica}}$$

Tafel halló en forma experimental que el flujo neto de corriente variaba linealmente con la magnitud de la desviación que tiene el potencial de equilibrio.

$$\eta = a \pm b \log i(\text{neta})$$

Dónde η se le conoce como sobrepotencial, $i(\text{neta})$ es la densidad de corriente neta anódica o catódica, a y b son las constantes de Tafel.

Para propósitos generales η se define como:

$$\eta = E \text{ aplicado} - E \text{ equilibrio}$$

El valor de la constante a está relacionado con la velocidad de las reacciones anódicas y catódicas (i_0) bajo condiciones de equilibrio, cuando η es cero. Cuando la desviación del potencial de equilibrio es positiva (+) se dice que el proceso es anódico, el metal se oxida o se disuelve. Si la desviación es negativa (-), el potencial toma valores más negativos que el de equilibrio y el proceso es catódico, habiendo reacciones de reducción en la interfase metal/medio electrolítico. La siguiente figura representa la relación de η contra $\log i$ para la reacción anódica de disolución (corrosión) metálica de la pieza del metal cuando su potencial de equilibrio sufre una desviación en la dirección positiva (+ η) (cuadrante superior derecho).

Al incrementar la desviación en la dirección anódica, se estimula la velocidad de disolución del metal ($\log i$).

En la misma figura se aprecia la conducta que sucedería en el caso de que el metal se desvíe del equilibrio pero ahora en la dirección negativa o catódica ($-\eta$) [8][4]

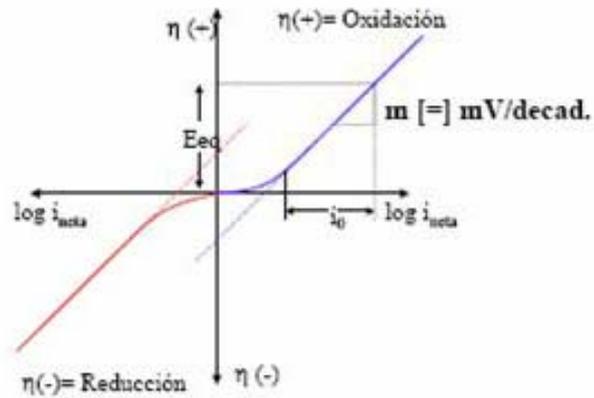


Fig. 8 Relación seno hiperbólico del sobrepotencial Vs. logaritmo de la corriente.

Es difícil interpretar la figura anterior especialmente cuando tratamos con la magnitud de i_0 . Por lo que una manera más fácil de interpretar esta misma relaciones como se representa a continuación y se obtiene al doblar el lado izquierdo sobre el derecho tal y como se muestra en la siguiente figura [8][4].

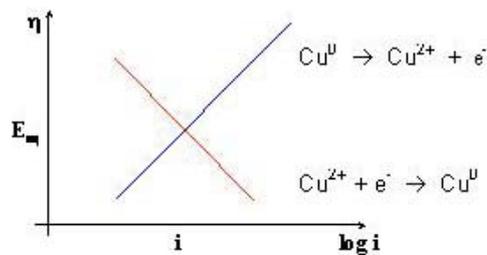


Fig. 9 A este tipo de diagramas se les conoce con el nombre de Diagramas de Evans.

Para explicar la Cinética de un Proceso de Corrosión, que es un proceso espontáneo, nos basamos en el concepto de polarización del equilibrio del Zn/Zn^{2+} .

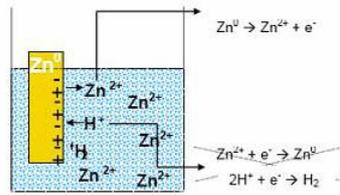


Fig. 10 Cinética de un proceso de corrosión.

En contraste al caso del cobre, cuando un pedazo de zinc se pone en una solución acuosa deareada de sus propios iones, este se corroe. Esto es debido a que el desprendimiento de hidrógeno es termodinámicamente posible ($E_{Zn^{2+}} < E_{H^+}$). Debido a heterogeneidades presentes en la superficie del metal zinc, se establecen de inmediato zonas anódicas y zonas catódicas las cuales desarrollan entre sí diferencias de potencial, acarreado como consecuencia de ello un flujo neto de electrones de las zonas anódicas a las catódicas y con ello, el establecimiento de la corrosión. Así es que los dos sistemas electroquímicos presentes, uno basado en el equilibrio Zn/Zn^{2+} y el otro en el equilibrio H^+/H^2 , buscan inicialmente mantener un equilibrio sobre la misma superficie del metal. Sin embargo, la corrosión que ocurre lo impide. Por un lado el zinc se disuelve y por el otro el hidrógeno gaseoso se desprende de zonas metálicas que funcionan como cátodos. Al haber corrosión, hay un flujo de corriente y por lo tanto ninguno de los sistemas electroquímicos está en equilibrio. De ahí se desprende que ambos sistemas se desvían, de sus potenciales de equilibrio (se polarizan) y alcanzan un potencial común de electrodo en donde sucede que la corriente anódica de disolución (la velocidad con que se corroe el zinc) es igual a la corriente catódica (la velocidad con que se desprende el hidrógeno). El diagrama de Evans que se presenta a continuación muestra el análisis de este suceso. [4]

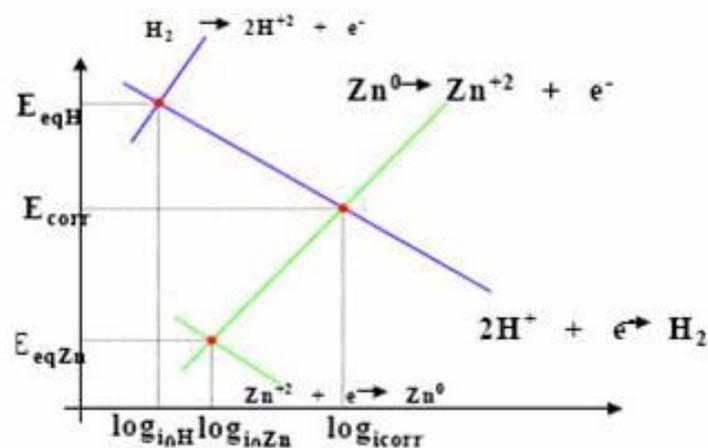


Fig. 11 Diagrama de Evans.

El potencial uniforme al que se llega sobre la superficie metálica se llama el potencial de corrosión (E_{corr}). La velocidad de corrosión está dada por i_{corr} , la cual puede ser convertida a pérdida de peso usando las Leyes de Faraday.

El ejemplo anterior pone de manifiesto, una vez más, que **durante el proceso de corrosión de un metal se llevan a cabo simultáneamente reacciones anódicas y catódicas** sobre la superficie de éste. En las zonas anódicas el metal se disuelve y en las zonas catódicas ocurren reacciones de reducción entre el metal y el medio, por ejemplo la reducción de H^+ . Ni las fases anódicas ni las catódicas se encuentran en su potencial de equilibrio ($E_{Zn/Zn^{2+}}$ y E_{H/H^+} respectivamente). Ambos potenciales de equilibrio son desplazados a un valor común, el potencial de corrosión, en el cual la velocidad de oxidación del metal (corrosión) es igual a la velocidad de reducción del protón H^+ . Por lo general, cuando medimos el potencial de un metal sumergido en un medio agresivo, contra un electrodo de referencia, lo que realmente medimos es el potencial de corrosión mixto, E_{corr} [4].

La técnica electroquímica de extrapolación de Tafel se fundamenta en la teoría de potencial mixto, la cual establece que la reacción anódica (oxidación) como catódica (reducción) se llevan a cabo simultáneamente, de modo que la densidad de corriente total es igual a la diferencia de las densidades de corriente de las dos reacciones, esto se expresa como sigue:

$$i = i_c - i_a$$

Cuando la corrosión es espontánea la contribución anódica y catódica son igual espero de signo contrario lo que da una corriente neta igual a cero. Lo que se expresa como sigue:

$$i_c = i_a = i_{corr}$$

Como no se puede medir la velocidad de corrosión de forma directa se tiene que utilizar la ecuación de Butler-Volmer. Para valores de sobre potencial elevados comparados con la situación de equilibrio, la ecuación Butler-Volmer puede ser simplificada por otra aproximación. Para sobre potenciales muy positivos (mayores a 0.100 volt) la contribución de la reacción catódica parcial puede ser despreciada, esto es:

$$\exp(-\beta)nF/RT \rightarrow 0$$

Siendo lo mismo para sobrepotenciales muy negativos donde la reacción anódica se desprecia. Esta aproximación se aplica para cuando $\eta \geq 0.100$ volt. La ecuación de Butler-Volmer para la reacción anódica despejando η :

$$\eta_a = -2.303RT [\log i_o / (1 - \beta) F] + 2.303 RT [\log i_a / (1 - \beta) F]$$

Para la reacción catódica:

$$\eta_c = -2.303RT [\log i_o / 1 - \beta F] + 2.303 RT [\log i_c / 1(- \beta) F]$$

Estas ecuaciones en forma general se considera análoga a: $\eta = a \pm b \log i$ (neta) que es la ley de Tafel.

La velocidad de corrosión de un proceso, i_{corr} , puede tomar diversos valores dependiendo de varios factores que modifican su magnitud destacando:

a) La densidad de corriente de intercambio, i_o . La i_o para una reacción depende mucho de la superficie en donde se lleve a cabo. Así por ejemplo, es más fácil desprender hidrógeno sobre hierro que sobre zinc. La red H^+ en $Fe > Zn$ por lo que $i_{corr4} > i_{corr3}$.

b) La diferencia de potencial termodinámico del par galvánico. Mientras más grande sea la diferencia de potencial entre la reacción anódica y la catódica, mayor será la velocidad de corrosión. El par Fe- Zn se tiene i_{corr1} , mientras para el par Ni -Zn se tiene un i_{corr2} .

c) La pendiente de Tafel, la cual nos indica la facilidad o dificultad de transferir cargas esta vez cuando una fase se aleja del equilibrio (las unidades de la pendiente son: volts /década de corriente). Al disminuir la magnitud de la pendiente para la reacción catódica (línea punteada), ésta se vuelve más fácil, aumentando por lo tanto la velocidad de corrosión de i_{corr4} a i_{corr5}

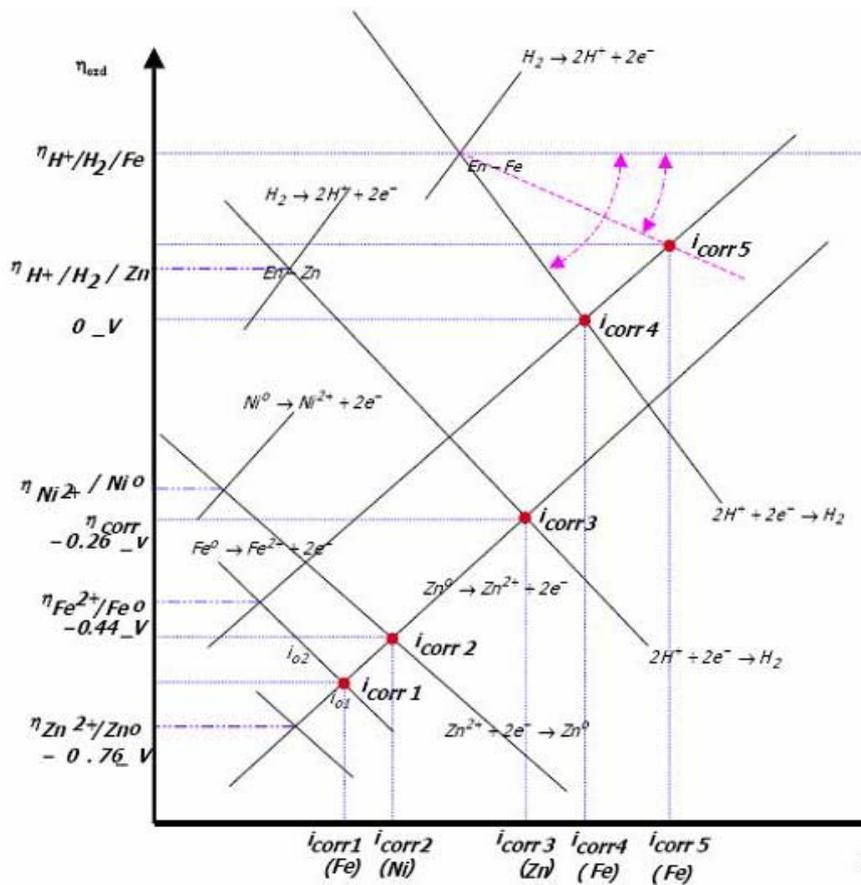


Fig. 12 Diagrama de Evans de dos reacciones.

Es importante remarcar el comportamiento de las curvas de Tafel que se observan en este diagrama son validas solamente cuando las velocidades de las reacciones anódicas o catódicas son gobernadas por la etapa de transferencia de carga en la interfase metal-electrolito y es lo que se llama **Polarización por activación**. Esto es, cuando esta transferencia sea el paso difícil o más lento. Esta conducta de Tafel puede tener las siguientes desviaciones:

La ecuación de Tafel sugiere que la densidad de corriente, i , aumentará continuamente al aumentar el sobrepotencial, η . De hecho, la velocidad de la reacción se verá limitada a menudo al aumentar η , debido a la poca rapidez con que los reactivos llegan a la superficie del electrodo o bien a la velocidad con que se difunden hacia el seno de la solución los productos de la reacción. La velocidad ya no es controlada por un paso lento de transferencia de carga y por consiguiente habrá desviaciones a la conducta de Tafel a lo que se le da el nombre de **Polarización por concentración**. Esto implica que se necesitará un mayor sobrepotencial que el que predice la relación de Tafel para poder seguir sosteniendo una corriente dada. En condiciones críticas de abastecimiento, se llega a una corriente límite, valor que no se incrementa aún y cuando el η se incremente. Esto quiere decir que el proceso no puede ir más rápido que la velocidad que impone el transporte de las especies hacia el electrodo.

Si hacemos una distinción entre el sobrepotencial por activación o transferencia (dado por Tafel) y el sobrepotencial por concentración (debido a la escasez de reactivos o exceso de productos) entonces el sobrepotencial total será dado por:

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{act}} + \eta_{\text{conc}}$$

Donde:

$\eta_{\text{act}} + \eta_{\text{conc}} \rightarrow$ Cinética.

$\eta_{\text{act}} \rightarrow$ Transferencia de carga.

$\eta_{\text{conc}} \rightarrow$ Transferencia de masa.

Las implicaciones de la polarización por concentración para un sistema que se corroe son muy importantes. En casos prácticos, lo más común es que la concentración por polarización afecte la reacción catódica debido, por ejemplo, al abastecimiento de H^+ o de oxígeno disuelto. En las figuras siguientes se exponen dos ejemplos, en uno de los cuales, (fig. 13), la i_{Lim} es grande que la i_{corr} y por lo tanto la polarización por concentración no es importante. Esto es debido a que la curva anódica interseca a la catódica en la región de Tafel. En el ejemplo (fig. 14) se tiene que si i_{Lim} es pequeña las dos curvas se intersecan en la región controlada por difusión. Ahí $i_{\text{Lim}} = i_{\text{corr}}$, y la velocidad de corrosión depende totalmente del transporte de reactivos catódicos hacia la superficie metálica. En este último caso el pobre abastecimiento del reactivo catódico, ya sea por una concentración baja de H^+ o de oxígeno atmosférico disuelto en el medio agresivo, ayudarán a reducir la velocidad de un proceso de corrosión al controlar la reacción catódica.

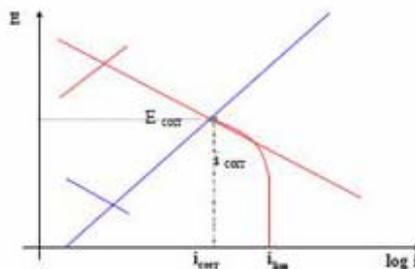


Fig. 13 Proceso controlado por la Polarización por Activación.

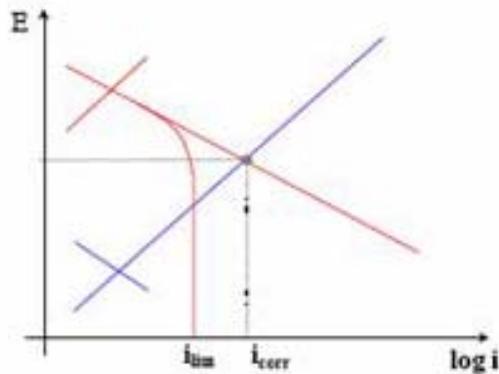


Fig.14 Proceso controlado por la Polarización por Concentración.

2.5.5 PASIVACIÓN [1].

La **Pasivación** es la formación de una película de óxidos o hidróxidos en la superficie que no reacciona con el medio. La pasivación puede definirse también como la pérdida de reactividad química que exhiben ciertos metales y aleación es bajo condiciones ambientales específicas.

La pasivación de un material se puede observar en un diagrama de Evans cuando la corriente de oxidación disminuye conforme se incrementa el potencial hasta tener un valor límite de corriente en la rama anódica.

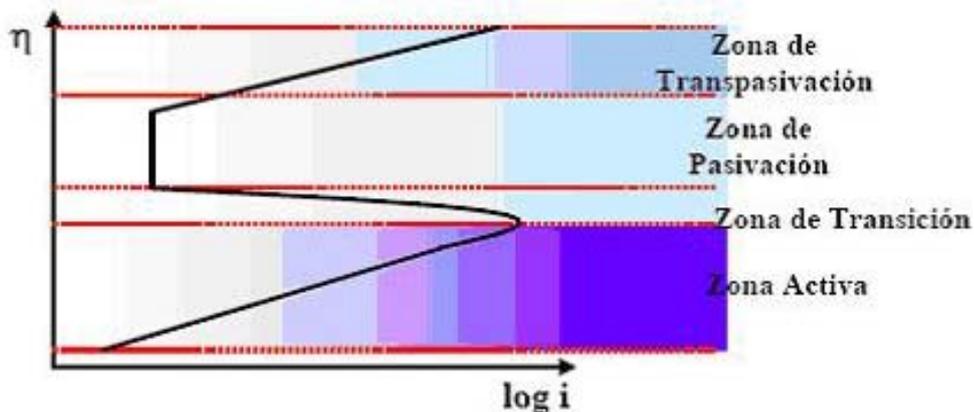


Fig. 15 Características de corrosión de un metal activo – pasivo en función del poder oxidante de la solución.

La corrosión de un material no es sólo la oxidación de éste, es por ello que la polarización catódica influye de manera importante en la formación de una capa pasiva de un material como se muestra en la figura siguiente:

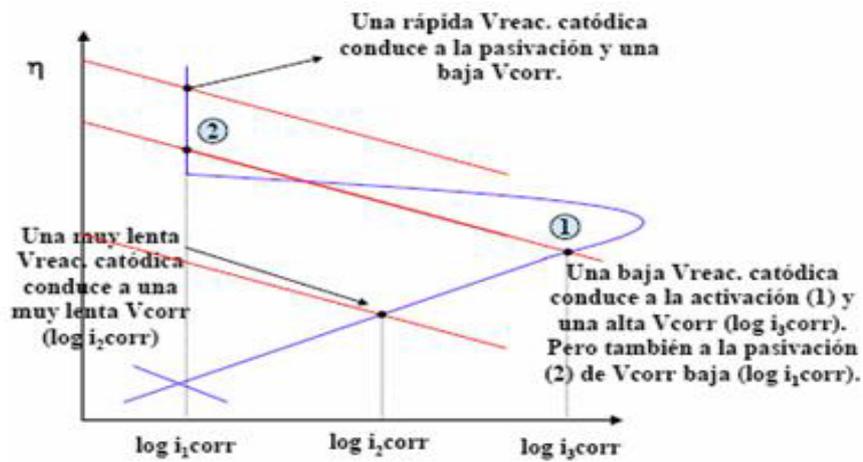


Fig. 16 Formación de capa pasiva.

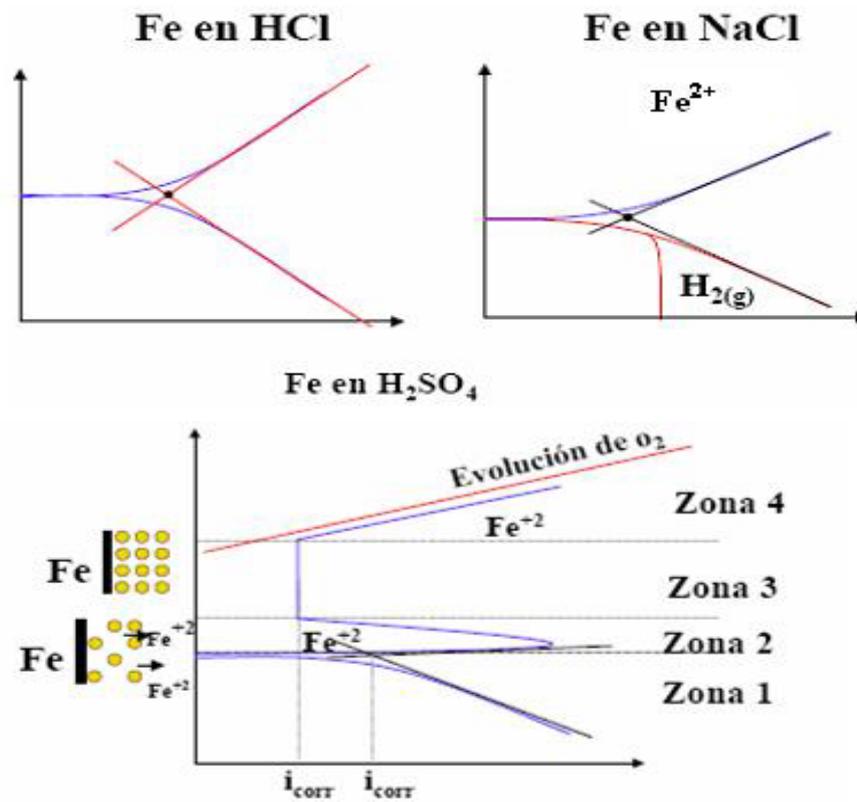


Fig. 17 Ejemplos Pasivación.

En los diagramas de Evans se pueden identificar los elementos que se requieren para que se lleve a cabo el **proceso espontáneo** de la **corrosión** los cuales son:

- 1) La **reacción electroquímica** Catódica/Anódica que se realiza en un **electrodo mixto**,
- 2) El **material** que disuelve o forma productos de oxido o hidróxidos con éste y esta representado por la curva de anódica del diagrama.
- 3) El **medio ambiente** que se reduce y esta representado por la curva catódica del diagrama.

2.5.6 CRECIMIENTO DE LA CAPA DE ÓXIDO [4].

Para explicar la formación de una capa de oxido en un material metálico en un medio de ambiente de agua consideramos los conceptos que hasta el momento se han explicado en esta unidad utilizando una placa de hierro.

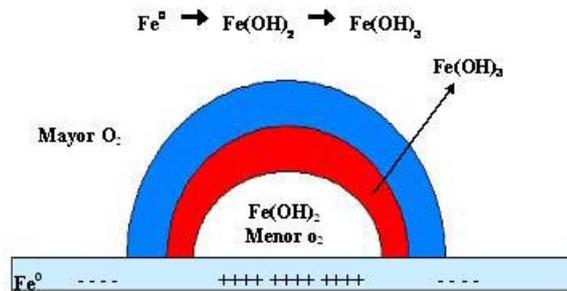
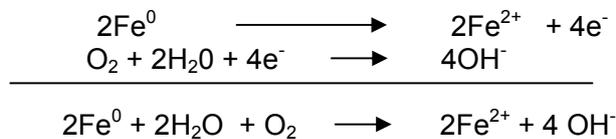
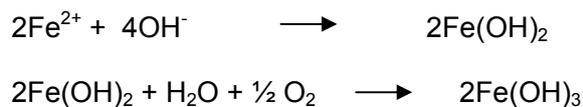


Fig. 18 Formación de capa de oxido.

Se tiene una placa de Fe^0 (*material*) la cual esta expuesta a un agota de agua (*medio ambiente*) y existe una diferencia de la cantidad de oxigeno disuelto en el líquido en contacto con ésta superficie que genera celda de concentración, que se le conoce como a aireación diferencial. El material se polariza positivamente en el centro y negativamente en las orillas (*electrodo mixto*), dando lugar a que se realice el proceso espontáneo de la corrosión (*reacción electroquímica*) donde la única especie que energéticamente que puede reducirse es el Oxigeno $E_{c \text{ oxígeno}} > E_{c \text{ hierro}}$. Las reacciones que se están llevando a cabo son:



El producto primario de la Oxidación del Fe es $Fe(OH)_2$ de color blanco, que a su vez se oxida a $Fe(OH)_3$ de color rojizo y es a lo que se llama herrumbre: La herrumbre es la manifestación de la corrosión del Fe y sus aleaciones (aceros).



2.5.7 EFECTO DEL AGENTE OXIDANTE, VELOCIDAD DE LA SOLUCIÓN, TEMPERATURA, DE LOS PRODUCTOS DE LA CORROSIÓN EN LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN [1].

Otras formas de observar el deterioro de un material, además del diagrama de Evans, es graficando la velocidad de corrosión (material) contra: agente oxidante, velocidad de la solución, productos de la corrosión, temperatura, etc (el medio ambiente.). Al igual que en el diagrama de Evans el comportamiento de la reacción electroquímica cambia de acuerdo a la interacción que tiene el material con el medio ambiente al cual esta expuesto. Las figuras que se presentan a continuación muestran estas diferencias. En estas figuras también se puede observar las zonas de activación, pasivación y transpasivación que sufre el material, así como el decremento de la velocidad de corrosión cuando se termina el reactivo que se reduce en el proceso de corrosión (graficas de temperatura y productos de corrosión).

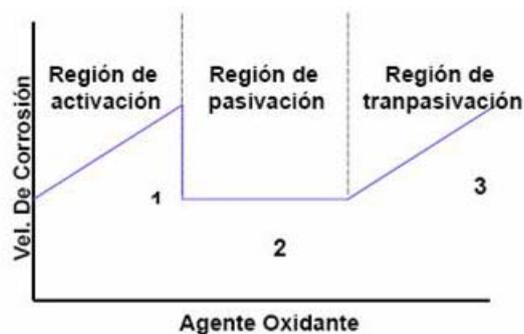


Fig. 19 Gráfica de Velocidad de Corrosión vs. Agente Oxidante.

Ejemplos de materiales que presentan este comportamiento:

Ejemplos de materiales que presentan este comportamiento:

1. Monel en $\text{HCl} + \text{O}_2$
Cu en $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{O}_2$
Fe en $\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$
- 1 - 2. 18Cr – Ni en $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{Fe}^{3+}$
Ti en $\text{HCl} + \text{Cu}^{2+}$
2. 18Cr – 8Ni en HNO_3
Hastelloy C en FeCl_3
- 2 - 3. 18Cr – 8Ni en $\text{HNO}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$
- 1 – 2 - 3. 18Cr – 8Ni en una mezcla concentrada de $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{HNO}_3$ a diferentes temperaturas

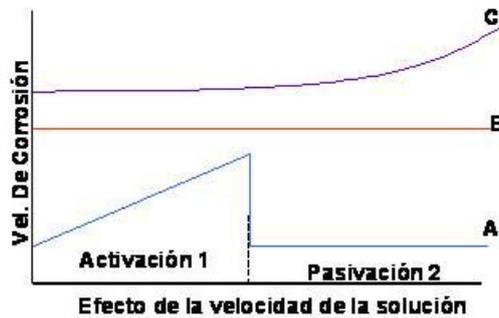


Fig. 20 Gráfica de Velocidad de Corrosión vs. efecto de la velocidad de la solución.

Ejemplos de materiales que presentan este comportamiento:

- A1.** Fe en $H_2O + O_2$; Cu en $H_2O + O_2$.
- A1-2.** 18Cr-8Ni en $H_2SO_4 + Fe^{3+}$; Ti en $HCl + Cu^{2+}$
- B.** Fe en solución diluida de HCl ; 18Cr-8Ni en H_2SO_4
- C.** Pb en solución diluida de H_2SO_4 ; Fe en solución diluida de H_2SO_4

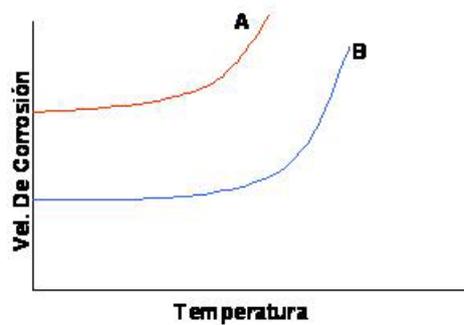


Fig. 21 Gráfica de Velocidad de Corrosión vs. Temperatura.

Ejemplos de materiales que presentan este comportamiento:

Curva A 18Cr-8Ni en H_2SO_4
Ni en HCl
Fe en HF

Curva B 18Cr-8Ni en HNO_3
Monel en HF
Ni en $NaOH$

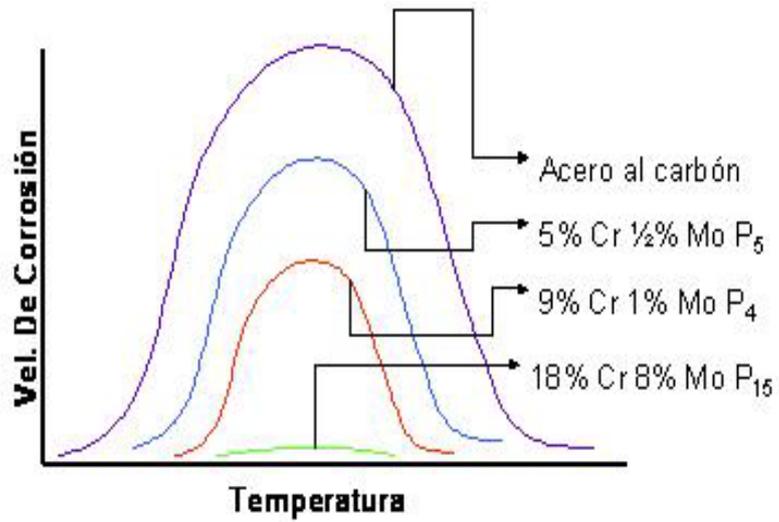


Fig. 22 Corrosión de aceros en crudo contenidos en azufre.

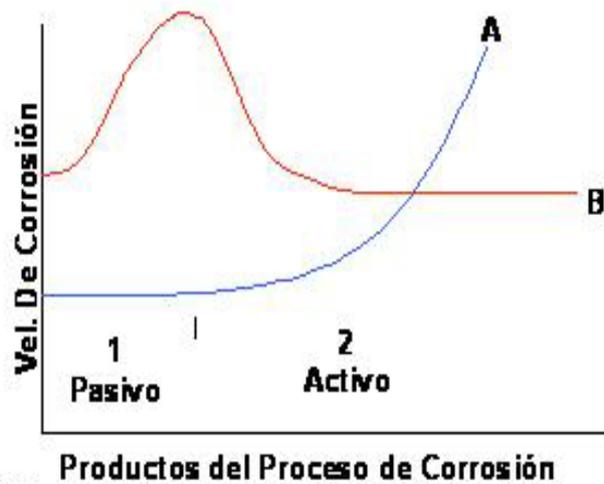


Fig. 23 Gráfica de Velocidad de Corrosión vs. Productos del proceso de C

Ejemplos de materiales que presentan este comportamiento:

A1.

Ni en NaOH
18Cr-8Ni en HNO₃

A1-2.

Mo en HCl
Pb en H₂SO₄

B.

Al en acetato y HNO₃
18Cr-8 Ni en H₂SO₄
Fe en H₂SO₄

2.5.8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fontana M.G., & Greene N. D. *Corrosion Engineering*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- [2] Sastri V. S. (1998). *Corrosion inhibitors principles and applications*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Oropeza G. M. T., & Ponce de León A.C.A., González M.I. (2000). *Principios y aplicaciones de los procesos electroquímicos*. México D.F.: Impresiones y diseño de la UAM-I.
- [4] Javier Ávila M, & Joan Genescá. (1996). *Más allá de la Herrumbre. México*. Fondo de cultura económica, Colección: L Ciencia desde México, num. 9
- [5] Memorias de XIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (2004). San Luis Potosí, S.L.P, México: Sociedad Mexicana de Electroquímica.
- [6] Proyecto D.328 (2001). *Estudio y desarrollo de inhibidores de corrosión usando simulación molecular y técnicas Electroquímicas*. México D.F. De La Coordinación de Simulación Molecular del IMP.
- [7] Mariaca R. L. Genescá L. J., Uruchutu C. J., Salvador Hdez, L., Veleza L., Maldonado L.,(1999). *Corrosividad Atmosférica*. México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- [8] Argaez V.E. (1972). *Corrosión*. Tula de Allende, Hidalgo, México: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos.
- [9] Casillas N.S. (2001). *Curso –Taller Corrosión y su control*. Guadalajara, Jalisco, México: Universidad de Guadalajara.

Unidad III

FORMAS DE CORROSION.

3.1 INTRODUCCIÓN.

La tercera unidad, contemplada dentro de la asignatura de Corrosión y Degradación, dará paso a comprender las formas de corrosión y degradación que se presentan en un material.

En la tercera unidad se comenzara por conocer como se clasifica la corrosión, en base a los elementos que deben estar presentes para que el proceso de corrosión ocurra.

Por otra parte, esta unidad dará cabida a la comprensión de cuales son los componentes que se reúnen para provocar cada tipo corrosión, cuales son sus productos, en donde se presenta y que se tiene que hacer para evitarla en cada caso. Es por ello que al igual que las unidades anteriores se le pide al alumno el pleno dominio de los objetivos planteados en esta unidad.

3.2 OBJETIVOS.

1. Identificar las diferentes formas de corrosión, su mecanismo y su control en un material dado.
2. Describir en un equipo de proceso o estructura que tipo de corrosión localizada está presente.
3. Interpretar las tablas de FEM y series Galvánicas como herramientas en el estudio de la corrosión.

3.3 ORIENTACIONES PARA EL ESTUDIO.

Es importante que tomes en cuenta que conocer las diferentes formas de corrosión y degradación que pueden estar presentes en un material y los mecanismos que la originan es de gran importancia ya que nos permitirán eliminar o aislar los principales elementos que provocan este proceso alargando la vida útil del material y evitando daños causados por la corrosión. Por otra parte, el conocer las diferentes formas de corrosión nos permitirá reconocer en que partes de una estructura o una línea de proceso industrial puede existir el deterioro y corrosión de un material.

3.4 ESTRUCTURA TEMÁTICA.

1. Clasificación de la corrosión.
2. Corrosión uniforme
3. Corrosión galvánica.
4. Corrosión por erosión.
- 5 Corrosión por socavados.
- 6 Corrosión por picaduras.

- 7 Corrosión selectiva.
- 8 Corrosión intergranular.
- 9 Corrosión por tensión.
- 10 Corrosión por fragilización de hidrógeno.
- 11 Corrosión microbiológica.

3.5 DESARROLLO DE CONTENIDOS.

3.5.1 CLASIFICACIÓN DE LA CORROSIÓN [10].

La corrosión ocurre en muchas y variadas formas pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

1.- Naturaleza de la sustancia corrosiva (de acuerdo al Medio).

La corrosión puede ser clasificada como:

- ◆ Húmeda, se requiere de un líquido o humedad.
- ◆ Seca, se desarrolla generalmente con gases a altas temperaturas.

2.- Mecanismo de corrosión (de acuerdo a la Reacción).

Comprende las reacciones electroquímicas o bien las reacciones químicas.

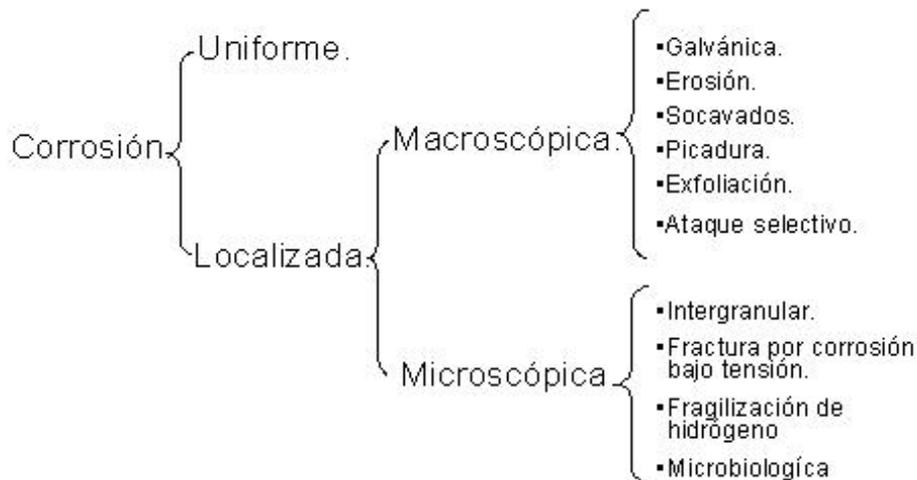
- ◆ Oxidación.
- ◆ Corrosión electroquímica.

3.- Apariencia del metal corroído (de acuerdo al Material).

- ◆ Uniforme.
- ◆ Localizada.

Esta última es la más usada para identificar las diferentes formas de corrosión que se presentan en la vida industrial y cotidiana. Esta clasificación es la que abordaremos en esta unidad para conocer los mecanismos que la originan y la forma en la que se puede evitarla o prevenir que está ocurra.

Dentro de esta clasificación tenemos que está se divide en:



3.5.2 CORROSIÓN UNIFORME

¿Que es la Corrosión Uniforme? [10]

Es el ataque uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica, es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química.



Fig. 24 Corrosión uniforme.

¿Cómo controlarla?

Es necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura.

Por otra parte, la corrosión uniforme es la forma más fácil de medir por lo que las fallas inesperadas pueden ser evitadas simplemente por inspección regular.

3.5.3 CORROSIÓN GALVÁNICA

¿Que es la Corrosión Galvánica? [10]

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes en contacto (o conectados por un conductor eléctrico) se exponen a una solución conductora.

El potencial eléctrico que existe entre metales diferentes actúa como fuerza directriz para pasar corriente a través del agente corrosivo, lo que da por resultado la corrosión de uno de los metales del par.

La diferencia de potencial desarrollada entre los metales del par, puede ser medida para un medio dado y está tabulada en lo que se llama una serie galvánica.

Tal serie, referida al agua de mar, para varios metales y aleaciones, se muestran en la tabla 5, por regla general la corrosión galvánica es más fácil de que ocurra mientras más separados estén el par en la serie.

TABLA 5 Serie galvánica en agua de mar, de algunos materiales metálicos comerciales [10].

ACTIVO O ANÓDICO		ACTIVO O ANÓDICO
↑		↑
	LATÓN ADMIRALTY	MAGNESIO
	LATÓN ROJO	ALEACIONES DE MAGNESIO
	COBRE	ZINC
	BRONCE AL SILICIO	ACERO GALVANIZADO
	CUPRONIQUEL 70-30	ALUMINIO 1100
	BRONCE G.	ALUMINIO 2024
	SOLDADURA DE PLATA	ACERO
	NIQUEL (PASIVO)	HIERRO DULCE
	ALEACIÓN 76 Ni-16 Cr-7 Fe (PASIVO)	HIERRO COLADO
	ACERO INOXIDABLE 13 Cr, TIPO 410 (PASIVO)	ACERO INOXIDABLE 13%Cr, TIPO 410 (ACTIVO)
	ACERO INOXIDABLE 18-8 TIPO 304 (PASIVO)	ACERO INOXIDABLE 18-8, TIPO 304 (ACTIVO)
	PLATA	SOLDADURA Pb-Sn
	GRAFITO	PLOMO
	ORO	ESTAÑO
	PLATINO	METAL MUNTZ
		BRONCE AL MAGNESIO
		LATÓN NAVAL
		NIQUEL (ACTIVO)
		ALEACIÓN 76 Ni-16 Cr-7 Fe (ACTIVO)
		ALEACIÓN 60 Ni-30 Mn-6 Fe-1 Mn
		LATÓN AMARILLO
↓		↓
NOBLE O CATÓDICO		NOBLE O CATÓDICO

El metal más activo viene a ser el ánodo en el proceso de corrosión y se corroe a mayor velocidad que si la corrosión se presentara solamente. El metal más noble viene a ser el cátodo y se corroe a menor velocidad

Ejemplos de Corrosión Galvánica.

¿Que es mejor, un perno de acero en una estructura de latón, o un perno de latón en una estructura de acero?

El acero sería el ánodo, por lo que un pequeño perno de acero en una larga estructura de latón sufriría una severa corrosión tipo galvánica. Un perno de latón sería protegido por la estructura de acero.



Perno de latón en una estructura de acero.

El cátodo pequeño de latón causaría incrementos pequeños en la corrosión de la estructura del acero. El perno estaría protegido de la corrosión por la pareja formada con el acero.



Perno de acero en una estructura de latón.

El ánodo pequeño de acero sufriría un incremento grande en la corrosión debido a la pareja formada con la estructura de latón.

Es común usar láminas de hierro galvanizada (recubierta de zinc)) para resistir la corrosión atmosférica, en este caso el cinc se corroe preferentemente. Si incluso tiene un agujero, el acero que queda expuesto no se corroe si existe buen contacto eléctrico del hierro al cinc, pasando por el agente de corrosión. La relación entre las áreas superficiales del metal activo y el metal noble es muy importante porque la velocidad de corrosión depende de la densidad de corriente. Naturalmente, ésta es mayor si el área del metal activo es pequeña comparada con la del metal noble.

Las condiciones para que la corrosión galvánica se presente son:

- 1.- Cuando se conectan metales diferentes, el más activo o metal anódico se corroe más rápidamente mientras que el metal más noble o metal catódico tiende a protegerse.
- 2.- A medida que la diferencia de potencial entre los dos metales se incrementa, la corrosión galvánica también aumenta. Un ejemplo de la corrosión galvánica se presenta al conectar tuberías de aluminio y de hierro que dan como resultado una mayor velocidad de corrosión en la tubería de aluminio.
- 3.- La corrosión galvánica se presenta también con mucha frecuencia en cambiadores de calor donde los tubos generalmente son de cobre, mientras que el resto del cambiador de calor es de acero. En estas condiciones, la parte de acero funciona anódicamente disolviéndose mientras que los tubos de cobre funcionan catódicamente protegiéndose.

En el problema planteado del cambiador de calor se puede ver el efecto que las áreas de los diferentes metales tienen en el fenómeno corrosivo, y puede establecerse que a medida que la relación de área catódica a área anódica se aumenta, la velocidad de corrosión se acelera.

Condiciones para que ocurra este tipo de corrosión:

- 1.- Presencia de dos metales electroquímicamente diferentes.
- 2.- Contacto eléctrico entre los dos metales diferentes.
- 3.- Los metales deberán estar expuestos a un electrolito.



fig. 25 Corrosion Galvanica.

Formas para evitar la corrosión galvánica:

La forma de prevenir este tipo de corrosión se puede hacer con los siguientes métodos:

- 1.- Evitando el uso de metales diferentes siempre que esto sea posible. Si esto no es práctico, tratar de usar metales que estén lo más cercanos posible entre sí en la serie galvánica.
- 2.- Es necesario evitar una relación de áreas desfavorables, es decir, bajo ninguna circunstancia conectar una pequeña área anódica a una gran área catódica.
- 3.- Si se utilizan metales diferentes, aislar eléctricamente uno del otro, instalando juntas de aislamiento.
- 4.- Si se necesita utilizar metales diferentes, y no pueden ser aislados, las partes anódicas deberán ser diseñadas de manera de poderlas reemplazar fácilmente o construirlas de materiales más gruesos para alargar la vida del equipo bajo los efectos de la corrosión.
- 5.- Conservar los recubrimientos.
Con los metales nobles (cátodo) es muy importante conservar el recubrimiento en la mayor área posible.

Con el ánodo es esencial recubrir completamente para evitar ataques por "área desfavorable" en los huecos que deje el recubrimiento.
- 6.- Póngase un tercer metal en contacto con los dos metales en cuestión. Este tercer metal se escoge de modo que sea más activo que los otros corroyéndose en lugar de la estructura.

Es fácil exagerar el problema de corrosión galvánica. Muchos pares de metales, aunque estén separados en la serie galvánica, pueden no fallar por corrosión galvánica. Igualmente materiales relativamente cerca en la serie raramente darán problemas. Por ejemplo, los aceros inoxidable y las aleaciones de cobre se usan frecuentemente en aplicaciones marinas, sin problemas.

3.5.4 CORROSIÓN POR EROSIÓN [10].

¿Que es la Corrosión por Erosión?

Cuando un medio corrosivo actuando sobre una superficie metálica aumenta su velocidad el ataque debido a desgaste mecánico y la corrosión aumenta. El resultado se conoce con el nombre de corrosión erosión. La importancia relativa del desgaste mecánico y corrosión es con frecuencia difícil de evaluar y varía mucho de una situación a otra.

El papel de la erosión se atribuye usualmente a la remoción de las películas superficiales protectoras, por ejemplo, las películas de óxido formadas por el aire o los productos de corrosión adherentes.

¿Cómo se presenta?

La corrosión erosión generalmente aparece en forma de agujeros poco profundos con el fondo alisado. El ataque puede seguir la forma de la dirección de la ruta que el agente de corrosión sigue al moverse sobre la superficie del metal.

La corrosión - erosión prospera en condiciones de alta velocidad, como turbulencias, incidencias, etc. Así que se observa con frecuencia en impulsores de bombas, agitadores y tuberías particularmente en curvas y codos.

Los sedimentos conteniendo partículas duras que se manejan a velocidades altas, también dan este tipo de problemas.

Este tipo de corrosión se evita con cambios de diseño o con selección de un material más resistente.



Fig. 26 deterioro de un material por la corrosión por Erosión.

¿Cómo evitar la Corrosión por Erosión?

Este material, usualmente aunque no siempre, será más resistente en condiciones de estancamiento y será también más duro.

En sistemas de tubería, la corrosión - erosión también puede reducirse incrementando el diámetro de la tubería lo cual disminuye la velocidad y la turbulencia.

El atenuamiento del flujo en curvas y el uso de baffles, son dos cosas útiles para minimizar los efectos de impacto.

Las tuberías interiores no deben dirigirse sobre las paredes del recipiente, siempre que sea posible. Los ensanchamientos en los tubos a la entrada de un haz, pueden reducir problemas de este tipo. Además, es juicioso diseñar el área que puede ser susceptible de erosión - corrosión de modo que pueda reemplazarse fácilmente.

Abrasión.

La corrosión por cavitación y desgaste son formas especiales de la corrosión por erosión. La primera es causada por la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie

del metal. Las altas presiones producidas por este colapso pueden disolver el metal, remover las películas protectoras, etc.

La segunda, corrosión por desgaste ocurre cuando las piezas de metal se deslizan una sobre la otra, causando daño mecánico a una o ambas piezas y el deslizamiento es generalmente un resultado de la vibración.

Esta corrosión se cree que juega uno de los siguientes papeles: el calor de la fricción oxida el metal y el óxido se desgasta o bien la remoción mecánica de las películas protectoras de óxido, o los productos de la corrosión resultantes, dan como resultado la exposición de superficies limpias del metal al medio agresivo, en tal forma, que el fenómeno corrosivo se acelera.

La corrosión por deslizamiento se atenúa utilizando materiales de construcción más duros, empleando lubricación o bien incrementando la fricción hasta un punto tal en que el deslizamiento es imposible.

3.5.5 CORROSIÓN POR SOCAVADOS [10].

La corrosión por socavados se atribuye generalmente a una o algunas de las siguientes causas: cambios de acidez en el socavado, ausencia de oxígeno en el socavado, crecimiento de iones perjudiciales, o disminución de un inhibidor.

Como todas las formas de ataques localizados, la corrosión por socavados no se presenta en todas las combinaciones metal - medio corrosivo.

Las condiciones alrededor de un socavado pueden con el tiempo llegar a ser completamente diferentes a las de una superficie abierta y limpia próxima al socavado. Es decir, se puede desarrollar un ambiente más agresivo y causar una corrosión localizada en el socavado.

Los socavados se forman en juntas, empaques, remaches, ribetes, cuerdas de los tornillos y alrededor de los barrenos de la pieza metálica. etc. También, son originados por depósitos de mugre, productos de la corrosión, rasguños sobre la pintura, etc.



Fig. 27 Corrosión por socavados, la cual se aprecia en las cuerdas de los tornillos y alrededor de los barrenos de la pieza metálica.

¿Cómo evitar la Corrosión por Socavados?

Algunos materiales son más susceptibles a este tipo de corrosión que otros: Aquellos que dependen de una película por formación de oxígeno para su protección contra la corrosión como los aceros inoxidable y el titanio.

Estos materiales pueden suplirse con aleaciones para mejorar su resistencia. Esta solución, conjuntamente con un diseño para minimizar los socavados y los trabajos de mantener limpias las superficies, serán lo indicado para combatir el problema.

3.5.6 CORROSIÓN POR PICADURAS [10].

La corrosión por picaduras (pitting) es la formación de hoyos en una superficie relativamente no atacada. Estos agujeros pueden tener varias formas. La forma de la picadura con frecuencia tiene que ver con el crecimiento de la misma, por las mismas razones anotadas en la corrosión por socavados. Una picadura, puede en efecto, considerarse como un socavado que se forma por si mismo.

La corrosión por picadura es un proceso lento que puede llevarse meses y años antes de ser visible pero que naturalmente causará fallas inesperadas. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales.



Fig. 28 Corrosión por picadura en una superficie plana y alrededor de una tubería.

¿Cómo evitar la Corrosión por Picadura?

Para reducir la corrosión por picadura se necesita una superficie limpia y homogénea, por ejemplo, un metal homogéneo y puro con una superficie muy pulida deberá ser generalmente, mucho más resistente que una superficie que tenga incrustaciones, defectos o rugosidad.

La limpieza de la superficie y la selección de materiales conocidos, resistentes a la formación de picaduras en un medio ambiente determinado, es generalmente el camino más seguro para evitar este tipo de corrosión

3.5.7 CORROSIÓN POR EXFOLIACIÓN Y LIXIVIACIÓN SELECTIVA [10].

La exfoliación es una corrosión bajo la superficie que se inicia en una superficie limpia pero se propaga hacia abajo de ella. Se diferencia de las picaduras en que el ataque tienen una apariencia laminar y se van comiendo capas completas de material. El ataque se nota porque la superficie se marca por escamas o ampollas.

El extremo de una muestra parece un paquete de naipes mal acomodado. Este fenómeno es bien conocido en las aleaciones de aluminio y se corrige con tratamientos térmicos y aleaciones seleccionadas.

La Lixiviación Selectiva. (llamada también separación) es la remoción de un elemento de una aleación. El ejemplo más común es la lixiviación del zinc de una aleación cobre-cinc.

Esta corrosión es perjudicial principalmente porque da un metal poroso con propiedades mecánicas pobres.

¿Cómo evitar la Corrosión por Exfoliación?

El remedio consiste en usar aleaciones no susceptibles a este fenómeno.

3.5.8 CORROSIÓN INTERGRANULAR O INTERCRISTALINA [10].

Para entender este tipo de ataque es necesario considerar que cuando un metal fundido se nuclea en un molde, su solidificación comenzó con la formación de núcleos al azar, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce con el nombre de granos o cristales.

El arreglo atómico y los espaciamientos entre las capas de los granos, son los mismos en todos los cristales de un metal dado, sin embargo, debido a la nucleación al azar, los planos de los átomos en las cercanías de los granos no encajan perfectamente bien y el espacio entre ellos recibe el nombre de límite de grano. Si se dibuja una línea de 2.5 cm de longitud sobre la superficie de una aleación, está deberá cruzar aproximadamente 1,000 límites de grano.

Los límites de grano son a veces atacados preferencialmente por un agente corrosivo y el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite.

Esta corrosión generalmente ocurre porque el agente corrosivo ataca preferencialmente el límite de grano o una zona adyacente a él, que ha perdido un elemento necesario para tener una resistencia a la corrosión adecuada.

En un caso severo de corrosión intercrystalina, granos enteros se desprenden debido a la deterioración completa de sus límites, en cuyo caso, la superficie aparecerá rugosa al ojo desnudo y se sentirá rasposa debido a la pérdida de granos.



Fig. 29 Corrosión intergranular. Desprendimiento de granos.

¿Cómo evitar la Corrosión intercrystalina?

El fenómeno de límite de grano que causa la corrosión intercrystalina es sensible al calor por lo que la corrosión de este tipo, es un subproducto de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos y puede ser corregido por otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada.

3.5.9 CORROSIÓN DE FRACTURA POR TENSIÓN [10].

La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo dará como resultado en algunos casos, la fractura de una aleación metálica. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque pero afortunadamente el número de combinaciones aleación-corrosivo que causan este problema, son relativamente pocos. Sin embargo, hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios.

Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, tratamientos térmicos o bien pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo.

Las fracturas pueden seguir caminos intercrystalinos o transcrystalinos que a menudo presentan una tendencia a la ramificación.

Alguna de las características de la corrosión de fractura por tensión son las siguientes:

- a) Para que esta corrosión exista se requiere un esfuerzo de tensión.
- b) Las fracturas se presentan quebradizas en forma macroscópica, mientras que las fallas mecánicas de la misma aleación, en ausencia de un agente corrosivo específico, generalmente presentan ductilidad.
- c) La corrosión por esfuerzos depende de las condiciones metalúrgicas de la aleación.

- d) Algunos medios ambientes específicos generalmente causan fractura en una aleación dada. El mismo medio ambiente no causa fracturas en otras aleaciones.
- e) La corrosión por esfuerzo puede ocurrir en medios ambientes considerados no agresivos para una aleación dada, por ejemplo la velocidad de corrosión uniforme es baja hasta que se presenta una fractura.
- f) Largos periodos de tiempo, a menudo años, pueden pasar antes de que las fracturas sean visibles, pero entonces al presentarse, se propagan rápidamente con el resultado de una falla inesperada.
- g) La corrosión por esfuerzo no esta completamente entendida en la mayoría de los casos, sin embargo, en la actualidad se dispone de muchos datos para ayudar al ingeniero a evitar este problema.

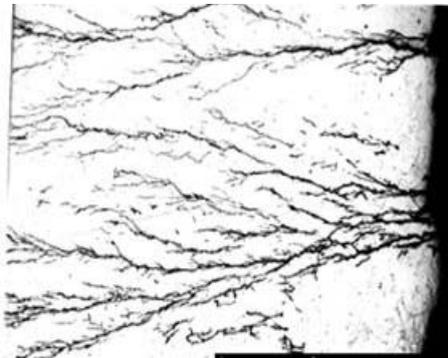


Fig. 30 Una forma de fallas ocasionada por corrosión por tensión.

¿Cómo evitar este tipo de Corrosión?

Para combatir la corrosión de fracturas por tensión, es necesario realizar el relevado de esfuerzos o seleccionar un material más resistente.

La Corrosión por Fatiga.

Es una forma especial del tipo de corrosión de fractura por tensión y se presenta en ausencia de medios corrosivos, debido a esfuerzos cíclicos repetidos. Estas fallas son muy comunes en estructuras sometidas a vibración continua.

La corrosión por fatiga se incrementa naturalmente con la presencia de un medio agresivo tal como el esfuerzo necesario para producir la corrosión por fatiga, se reduce en algunas ocasiones hasta la mitad del necesario, para producir la falla en aire seco.

Un metal que falla por corrosión por fatiga por lo general se hace notar a través de productos de la corrosión sobre la superficie de la fractura. Esto puede dar una falsa indicación en algunos casos, ya que una superficie de fatiga usual puede algunas veces

corroerse antes de ser inspeccionada. En general habrá una falla menos ramificada que en una falla debida a corrosión - esfuerzo regular.



Fig. 31 Falla de un material por la corrosión por fatiga.

¿Cómo evitarla la corrosión por fatiga?

No se sabe mucho acerca de la corrosión por fatiga. Los métodos para evitarla son usualmente preventivos, iniciándose con cambios de diseño, ya que es difícil para la propagación de una grieta una vez que se ha iniciado.

3.5.10 CORROSIÓN POR FRAGILIZACIÓN DE HIDRÓGENO [10].

El término de fragilización por hidrógeno se confunde frecuentemente con la corrosión de fractura por tensión, debido a que el hidrógeno desempeña una función en algunos casos de ésta y para distinguir la fragilización por hidrógeno de la corrosión de fractura por tensión es conveniente juzgar los siguientes conceptos:

- a) La fractura debido al hidrógeno introducido en el metal sin corrosión de éste, por ejemplo en la protección catódica, no es definitivamente corrosión de fractura por tensión.
- b) La fractura debido al hidrógeno producida por una alta velocidad de corrosión uniforme como en el decapado, tampoco es corrosión de fractura por tensión porque no se necesita tener un esfuerzo mientras el hidrógeno se produce y la fractura se presenta posteriormente cuando la tensión es aplicada después de la reacción corrosiva con liberación de hidrógeno.
- c) Cuando el hidrógeno se produce por corrosión local en una fractura o picadura sobre un metal sometido a esfuerzo de tensión y resulta una propagación en la fractura, entonces sí se considera que la corrosión pertenece al tipo de corrosión de fractura por tensión.

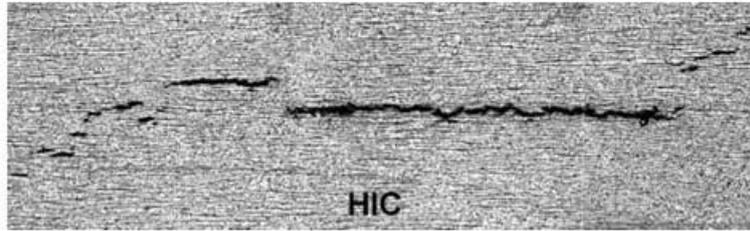


Fig. 32 En la figura se muestra una de las formas en las que se puede observar el deterioro que ocasiona la corrosión por evolución de hidrógeno.

¿Como evitar este tipo de Corrosión?

Evitando la evolución de hidrógeno o cambiando el material por uno en donde el hidrógeno no difunda en su estructura.

3.5.11 CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA.

La corrosión microbiológica se presenta por lo general en ductos ya sea en el subsuelo o fuera de él, en plantas de tratamiento de aguas negras, así como en barcos. Factores como la concentración de oxígeno disuelto, pH, temperatura, concentración de cloruros y sulfatos, agitación y velocidad del medio, contaminación del medio, etcétera favorecen el medio ambiente de bacterias sulforreductoras. Un gran número de ellas, en el suelo o en el agua, descomponen activamente la materia orgánica, materiales y minerales, participando así en los ciclos naturales del carbono, nitrógeno y azufre.

La corrosión microbiológica puede definirse como un proceso metabólico bacteriano que origina o acelera la destrucción de los metales.

Los microorganismos influyen sobre los procesos de corrosión a través de mecanismos que les permiten adquirir la energía necesaria para las actividades vitales. Esta energía puede adquirirse a través de tres medios:

- a) Respiración aerobia, que consiste en la eliminación progresiva de hidrógeno de los sustratos orgánicos. El hidrógeno es oxidado por el oxígeno del aire.
- b) Respiración anaerobia, en la cual el sustrato orgánico es también oxidado por eliminación de hidrógeno, y éste reduce los compuestos inorgánicos.
- c) Fermentación, proceso anaerobio en el cual el sustrato orgánico no es completamente oxidado.

Al igual que la corrosión, los procesos metabólicos se basan en la transferencia de iones hidrógeno o de electrones. La actividad de los microorganismos corresponde a valores de pH del medio que son también muy favorables a la corrosión. Los microorganismos que desempeñan un papel en la corrosión pueden clasificarse de dos maneras: desde los puntos de vista fisiológicos y los taxonómicos.

Se piensa, generalmente, que la corrosión de los metales se debe a las **bacterias anaerobias**, por ejemplo, el *desulfovibrio*. Sin embargo, existen diversos tipos de bacterias que hay que tener muy en cuenta desde el punto de vista de la corrosión, como las bacterias del hierro, *thiobacterias*, y las **bacterias aerobias** que producen ácido sulfhídrico.

Los cultivos microbianos son casi siempre sistemas fuertemente reductores. La actividad metabólica de las bacterias, resultante de su crecimiento y de su nutrición, sólo es posible gracias a la energía suministrada por la oxidación de los elementos nutritivos que ocasionan condiciones de reducción en el medio.

Las **bacterias aerobias** reducen los medios hasta un cierto nivel, que en general es moderado, aunque en algunos casos se llega a niveles altos. Las **anaerobias** presentes se aprovechan de estas nuevas condiciones y proliferan a su vez.

Así, los fenómenos de óxido-reducción desempeñan un papel muy importante en los procesos biológicos. Existen sustancias más fácilmente oxidables que otras. Esto puede determinarse midiendo la fuerza electromotriz o la diferencia de potencial generada por la corriente de electrones, obligándolos a pasar por un hilo conductor. Es lo que se conoce como potencial redox del medio. Este potencial se relaciona con el pH, la temperatura y la relación existente entre la concentración de sustancia oxidada y reducida. Las condiciones de oxidación corresponden a un potencial elevado; las de reducción, a una disminución del potencial.

Las bacterias más comunes se desarrollan a potenciales próximos o inferiores a 0 y pH comprendidos entre 6 y 9, zonas favorables a la corrosión. Esto quiere decir que si en un medio donde hay bacterias —que existen en todas partes en la naturaleza— los aportes nutritivos de origen orgánico son suficientes, las bacterias entran rápidamente en actividad, multiplicándose y metabolizando diferentes sustancias. Estos procesos ocasionan, de forma automática, la disminución del potencial redox, originando las condiciones electroquímicas favorables a la corrosión. Si estas condiciones existían ya, por la naturaleza del medio, serán activadas, y si no existían serán el origen de la corrosión.

¿Cómo evitar la corrosión microbiológica?

Los microorganismos no pueden desarrollarse más que en determinadas condiciones de pH. Para cada grupo microbiano existen pH límites y un pH óptimo. En general, los medios neutros convienen a las *bacterias heterótrofas* que pueblan los medios naturales.

Los límites de crecimiento de estas bacterias oscilan entre los pH de 5.5 a 8.5 o 9. Ciertas especies, como el *Thiobacillus*, se cultivan a pH muy bajos, de entre 1.8 y 2. La corrosión anaerobia se considera posible en valores de pH comprendidos entre 5.5 y 8.5.

Ante lo expuesto en el párrafo anterior una forma de evitar este tipo de corrosión es la de controlar el pH en intervalos donde las bacterias no puedan vivir.

TABLA 6. Tipos de Corrosión.

CORROSIÓN	QUE NECESITA	PROCESO DE CORROSIÓN	PRODUCTOS DE CORROSIÓN	DONDE SE ENCUENTRA	COMO SE EVITA
UNIFORME	Ataque uniforme sobre grandes áreas	Reacción química y electroquímica	Oxidos e Hidroxiidos	En los metales que tienen expuesta una gran área al medio corrosivo.	Recubrimientos protectores, inhibidores, protección catódica
GALVANICA	2 materiales diferentes, 1 solución electrolítica un contacto entre ellos	Reacción electroquímica, Oxidos.	Oxidos e Hidroxiidos	En 2 materiales distintos	Recubrimientos, aislamiento, que no exista contacto entre ellos.
SOCAVADOS	Cambios en la concentración de PH y de O ₂ , mugre, Barreno.	Disolución del material por reacciones redox	Oxidos e Hidroxiidos, agujeros con fondos planos	Remaches, empaques, juntas, ribetes.	Limpieza, cambiando el material no teniendo PH y Oxígeno
EROSION	Flujo turbulento, impacto, presión y fricción	Desgaste mecánico Reacción electroquímica, removiendo las películas superficiales protectoras.	Agujeros poco profundos.	Codos, cambios de sección, turbinas, unión de tubos, valvas, picaduras, agujeros	Evitando cambios de aireación, aumentando el diámetro, cambiando el material, aumentando la fricción

CORROSIÓN	QUE NECESITA	PROCESO DE CORROSIÓN	PRODUCTOS DE CORROSIÓN	DONDE SE ENCUENTRA	COMO SE EVITA
PICADURA	Cambio del medio: variación de oxígeno, PH, superficies rugosas, defectos	Electrolítica	Picaduras en la superficie, hoyos pequeños o agujeros	En superficies rugosas o no homogéneas inclusiones heterogéneas?	Cambiando el material, teniendo superficies limpias y no rugosas
EXPOLIACION	Medio filtrante	Electroquímica	Ampollas, escamas, laminar	Debajo de la superficie del material	Recubrimientos, cambio del material, tratamiento térmico
LIXIVIACION	Medio selectivo, un metal que se licivie.	Disuelve selectivamente al metal	Material poroso con propiedades mecánicas pobres	En materiales que son solubles a un medio	Cambiando al material o realizando tratamientos térmicos
INTERCRISTALINA O INTERGRANULAR	Elemento segregado en el límite de grano	Electroquímica por un medio corrosivo	Desprendimiento del grano, superficies rugosas, propiedades mecánicas bajas	Límite de grano, soldaduras y relevados de esfuerzos	Tratamiento térmico con una aleación modificada

CORROSIÓN	QUE NECESITA	PROCESO DE CORROSIÓN	PRODUCTOS DE CORROSIÓN	DONDE SE ENCUENTRA	COMO SE EVITA
FRACTURA POR TENSION	Esfuerzo, tratamiento térmico, esfuerzo cortante mecánico	Electroquímico localizada	Grietas, fracturas	Materiales sometidos a esfuerzos y a soldaduras	Tener menor esfuerzo en el material diseñado para soportar el esfuerzo
FRAGLIZACION DE HIDROGENO	H ₂ , en la superficie	Medio ácido, básico, electroquímica, difusión de hidrogeno en la estructura	Grietas, fracturas	Superficie en donde se lleva a cabo un proceso de reducción de hidrogeno	Con otro tipo de aleaciones, cambiando el medio
FATIGA	Esfuerzo cíclico mecánico	Estructuras sometidas a vibraciones continuas	Perdida de material tallos menores ramificadas	Materiales expuestos a vibraciones cíclicas, en ausencia de medios corrosivos	Cambios de diseño
MICROBIANA	Microorganismos medio a de cuando, oxígeno	Electroquímica deterioro del material selectivo	Poros con baja resistencia mecánica	Se encuentra en cualquier superficie donde exista agua acumulada	Mantenimiento modificando el medio, recubrimientos

3.5.12 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fontana M.G., & Greene N. D. *Corrosion Engineering*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- [2] Sastri V. S. (1998). *Corrosion inhibitors principles and applications*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Oropeza G. M. T., & Ponce de León A.C.A., González M.I. (2000). *Principios y aplicaciones de los procesos electroquímicos*. México D.F.: Impresiones y diseño de la UAM-I.
- [4] Javier Ávila M, & Joan Genescá. (1996). *Más allá de la Herrumbre. México*. Fondo de cultura económica, Colección: L Ciencia desde México, num. 9
- [5] Memorias de XIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (2004). San Luis Potosí, S.L.P, México: Sociedad Mexicana de Electroquímica.
- [6] Proyecto D.328 (2001). *Estudio y desarrollo de inhibidores de corrosión usando simulación molecular y técnicas Electroquímicas*. México D.F. De La Coordinación de Simulación Molecular del IMP.

- [7] Mariaca R. L. Genescá L. J., Uruchutu C. J., Salvador Hdez, L., Veleva L., Maldonado L.,(1999). *Corrosividad Atmosférica*. México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- [8] Argaez V.E. (1972). *Corrosión*. Tula de Allende, Hidalgo, México: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos.
- [9] Casillas N.S. (2001). *Curso –Taller Corrosión y su control*. Guadalajara, Jalisco, México: Universidad de Guadalajara.
- [10] Walsh F. (2000). *Un primer curso de Ingeniería química*. Alicante, España: Imprenta Gamma.
- [11] Ringbom (1963). *Complexation in Analytical Chemistry* Wiley-Interscience. New York.
- [12] Rojas, G. Trejo and M. T. Ramírez (1993). *Diagramas de Zonas de Predominio Aplicados al Análisis Químico*. México D. F. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

Unidad IV.

EVALUACION DE LA VELOCIDAD DE CORROSION.

4.1 INTRODUCCIÓN.

La cuarta unidad, contemplada dentro de la asignatura de Corrosión y Degradación, dará paso a comprender las diferentes formas que existen para evaluar la velocidad de corrosión y degradación de un material.

En esta unidad se comenzara por conocer cuales son las unidades en las que se mide el proceso de corrosión y degradación de un material en el ámbito industrial y científico.

Por otra parte, esta unidad dará cabida a la comprensión de las diferentes técnicas de laboratorio y de aplicación industrial que se utilizan en el estudio de la corrosión; entre las se encuentran las técnicas electroquímicas, las pruebas de botella y los procedimientos generados por la industria para este fin.

De igual forma que en las unidades anteriores se le pide al alumno el pleno dominio de los objetivos planteados en esta unidad.

4.2 OBJETIVOS.

- Evaluar la velocidad de corrosión mediante la aplicación de diferentes técnicas, métodos y procedimientos elaborados para este propósito.
- Manejar como herramientas los diferentes diagramas (Tafel y Evans) provenientes de las técnicas electroquímicas de polarización que evalúan la corrosión para establecer las condiciones donde se evita o disminuye la corrosión de un material en un ambiente dado.

4.3 ORIENTACIONES PARA EL ESTUDIO.

Es importante que tomes en cuenta que conocer las diferentes técnicas, métodos y procedimientos para evaluar la velocidad de corrosión en un material es de gran importancia ya que nos permitirá por un lado, estudiar la velocidad de corrosión de un material antes de ser expuesto a un medio ambiente determinado y por otro lado, prevenir los daños que puede causar la corrosión al retirar un material antes de que este falle. Por otra parte, el conocer las diferentes forma de evaluar la corrosión nos permitirá contar con las herramientas necesarias para establecer la vida útil de un material en un determinado ambiente (urbano, rural, industrial, etc.).

4.4 ESTRUCTURA TEMÁTICA.

1. Unidades de la velocidad de corrosión
2. Diagramas de Pourbaix.
3. Curvas de polarización.
4. Diagramas de Evans.

5. Medidas de impedancia.
6. Resistencia a la polarización.
7. Pruebas de corrosión.
8. Medición de la corrosión en plantas de proceso

4.5 DESARROLLO DE CONTENIDOS.

Evaluación de velocidades de corrosión [1][4][8].

4.5.1 UNIDADES DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN.

Velocidad de Corrosión es una relación entre una unidad de magnitud sobre una unidad de tiempo y comúnmente se expresa como mpy (milésimas de pulgada por año, m in/año)

La velocidad de corrosión puede ser calculada a través de la corriente de corrosión, haciendo uso de la ley de Faraday o a través de la pérdida de peso que sufre un material.

Mediante la ley de Faraday:

$$Q = n F m / M$$

Donde Q es la carga (C), F es la constante de Faraday (96,500 C/mol), n es el número de electrones transferidos, m es la masa del metal oxidado o reducido (g) y M es el peso molecular de material (g/mol)

Esta ley indica que la carga relacionada es directamente proporcional con la masa de la materia transformada electroquímicamente.

Realizando el despeje de la masa de la ecuación de la ley de Faraday y utilizando la ecuación ($Q = i t$), se obtiene:

$$m = Q M / (n F),$$

si : E.M. = M / n ,

$$m = Q E.M. / F$$

$$Q = i t$$

$$m = i t E.M. / F$$

La velocidad de corrosión en (g/s) = $m / t = i E.M. / F$

Dividiendo en ambos lados entre el área y la densidad del material corroído d (g/cm³).

$$m / (t A d) = i E.M. / (A d F)$$

Convirtiendo a milésimas de pulgada por año.

$$\text{Velocidad de corrosión (mpy)} = 0.13 j_{\text{corr}} (E.M.) / d$$

Donde las unidades de los elementos deben estar: J_{corr} ($\mu\text{A} / \text{cm}^2$), d (g/cm^3) y E.M. (g)
 Mediante la técnica gravimétrica de pérdida de peso la velocidad de corrosión en “milésimas” (1 milésima = 0.001in) de penetración por año (mpy) puede calcularse a partir de:

$$\text{mpy} = (534. W) / d . A . t$$

Donde:

W: Pérdida de peso en miligramos.

d: Densidad en $\text{gramos}\cdot\text{cm}^{-3}$.

A: Área en pulgadas cuadradas.

t: Tiempo en horas.

Para convertir:

1 mpy = 1.44 (mdd) / gravedad específica.

1 mpy = 0.0254 mm/año.

1 mpy = 25.4 μm /año.

1 mpy = 2.90 nm/h.

Una Comparación de mpy con equivalentes métricos basada en aleaciones ferrosas y de níquel típicas se muestra a en la tabla siguiente y muestra la calificación de la de la resistencia a la corrosión de acuerdo al intervalo de velocidad de corrosión en la que se encuentra estos materiales.

TABLA 7. Resistencia de la corrosión relativa.

Resistencia a la Corrosión relativa	mpy	mmlaño	μm /año	nm/h
Notable	<1	<0.02	<25	<2
Excelente	1-5	0.02,0.1	25-100	2-10
Bueno	5-20	0.1-0.5	100-500	10-50
Fallo	20-50	0.5-1	500-1000	50-150
Pobre	50-200	1-5	1000-5000	150-500
Inaceptable	200+	5+	5000	500+

4.5.2 DIAGRAMAS DE POURBAIX [1][4].

Los diagramas de potencial E / pH pueden entenderse como mapas que muestran las condiciones del poder oxidante de la solución (potencial) y la acidez o alcalinidad (pH) para las diferentes fases posibles presentes y estables en un sistema electroquímico acuoso.

Aplicaciones:

- Corrosión.
- Celdas de combustible.
- Baterías.
- Electro plateado.
- Metalurgia extractiva.

Utilidad en corrosión:

Son de interés especial para establecer las condiciones donde la corrosión es termodinámicamente imposible. Entonces, el potencial y/o el pH puede en algunos casos ajustarse para prevenir la corrosión.

Limitaciones de los diagramas de Pourbaix:

Para las condiciones usuales en áreas sobre el diagrama de Pourbaix donde es posible la corrosión, no pueden hacerse predicciones sobre la velocidad de corrosión.

Corrosión en metales.

- ◆ Las áreas del diagrama de Pourbaix son a menudo etiquetadas con zonas pasivas, zonas sujetas a corrosión y zonas inmunes.
- ◆ La corrosión es posible en áreas del diagrama de Pourbaix donde los iones del metal son solubles y estables. El metal es posiblemente resistente a la corrosión o pasivo en áreas donde el óxido es estable.
- ◆ La zona pasiva, donde un óxido es estable, se puede transpasar por la evolución de oxígeno y hidrógeno.
- ◆ En áreas donde solamente la forma reducida del metal es estable, el metal es termodinámicamente inmune.

Se tiene mucha información de diagrama de Pourbaix para diferentes metales referidos a la interacción con el H₂O, así como intervalos de concentración de algunos ácidos y bases donde los materiales son resistentes a la corrosión (V. S. Sastri, 1998). El motivo de que no se tenga diagrama de Pourbaix donde se considere la formación de complejos del metal con los iones del medio es por que no es tan fácil hacer estos diagramas.

La información siguiente muestra la forma de realizar un diagrama de Pourbaix para un metal de cobre que está expuesto en un medio de cianuros, obtenido de la literatura (v. reyes, 2002).

Se realizó el estudio de especiación química con el fin de establecer las especies electroactivas de Cu presentes en el baño de cianuro. El diagrama tipo Pourbaix (figura 1) se construyó utilizando los datos de la literatura (Y. Zhang, A. Ringbom y S. Caroli) de las especies solubles e insolubles de Cu, considerando la composición de un proceso de lixiviación de minerales ($pCN' = -\log [CN'] = 0.222$ y $pCu' = -\log [Cu'] = 1$) y de acuerdo con la metodología propuesta por A. Rojas y colaboradores. En el diagrama tipo Pourbaix (figura 1) se incluye la reducción y oxidación del agua que son trazadas con ayuda de las siguientes ecuaciones: $E_{H^+/H_2} = -0.06$ pH, $E_{O_2/H_2O} = 1.229 - 0.06$ pH.

TABLA 8. Estudio de especiación de cobre en medio de cianuros, $[CN^-]=0.6M$, $[Cu(I)]=0.1M$ y $[Cu(II)]$.

Datos de Cu (I)	log B1	log B2	log B3	log B4	Referencias
Cu-CN		24	28.6	30.3	A. Ringbom y S. Caroli
Cu (OH) _(s)		-14			Y. Zhang
CuCN _(s)		-19.1			Y. Zhang

Datos de Cu (II)	log B1	log B2	log B3	log B4	Referencias
Cu (OH)	6.3	12.8	14.5	15.6	A. Ringbom y S. Caroli
Cu (OH) _{2(s)}	-18.9				A. Ringbom y S. Caroli
Cu-CN				25	Y. Zhang
H-CN	9.2				A. Ringbom y S. Caroli

TABLA 9. Datos para realizar diagrama de Zonas de Predominio del Cu(I)-CN

PH	Equilibrio Representativo $Cu^+ + CN^- \rightleftharpoons Cu(CN)_2^+$	pCN'
PH < 9.2	$Cu^+ + 2HCN \rightleftharpoons Cu(CN)_2^- + 2H^+$	2.8 + pH
PH > 9.2	$Cu^+ + 2CN^- \rightleftharpoons Cu(CN)_2^-$	12
	Equilibrio Representativo $Cu(CN)_2^+ + CN^- \rightleftharpoons Cu(CN)_3^+$	
PH < 9.2	$Cu(CN)_2^+ + HCN \rightleftharpoons Cu(CN)_3^{2-} + H^+$	-4.6 + pH
PH > 9.2	$Cu(CN)_2^+ + CN^- \rightleftharpoons Cu(CN)_3^{2-}$	4.6
	Equilibrio Representativo $Cu(CN)_3^+ + CN^- \rightleftharpoons Cu(CN)_4^+$	
PH < 9.2	$Cu(CN)_3^+ + HCN \rightleftharpoons Cu(CN)_4^{3-} + H^+$	-7.5 + pH
PH > 9.2	$Cu(CN)_3^+ + CN^- \rightleftharpoons Cu(CN)_4^{3-}$	1.7

TABLA 10. Datos para realizar diagrama de Existencia Predominio para Cu(I) pCN'=0.222

PH	Equilibrio Representativo $Cu^+_{(s)} \rightleftharpoons Cu^+$	PCu(I)'
PH < 9.2	$Cu(OH)_{(s)} + HCN \rightleftharpoons CuCN_{(s)} + H_2O$	9.9
PH > 9.2	$Cu(OH)_{(s)} + CN^- + H^+ \rightleftharpoons CuCN_{(s)} + H_2O$	19.1 - pH
PH < 4.822	$CuCN_{(s)} + HCN \rightleftharpoons Cu(CN)_2^- + H^+$	4.3 - pH + pCN'
4.822 < pH < 7.722	$CuCN_{(s)} + 2HCN \rightleftharpoons Cu(CN)_3^{2-} + 2H^+$	8.9 - 2pH + 2pCN'
7.722 < pH < 9.2	$CuCN_{(s)} + 3HCN \rightleftharpoons Cu(CN)_4^{3-} + 3H^+$	16.4 - 3pH + 3pCN'
PH > 9.2	$CuCN_{(s)} + 3CN^- \rightleftharpoons Cu(CN)_4^{3-}$	-11.2 + 3pCN'

TABLA 11. Datos para realizar diagrama de Zonas de Predominio del Cu(II)-CN

PH	Equilibrio Representativo $\text{Cu}^+ + \text{CN}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^-$	pCN'
PH < 7.6	$\text{Cu}^{2+} + 4\text{HCN} \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 4\text{H}^+$	-2.95 + pH
7.6 < pH < 9.2	$\text{Cu}(\text{OH})_2 + 4\text{HCN} \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$	0.85 + 0.5pH
9.2 < pH < 12.3	$\text{Cu}(\text{OH})_2 + 4\text{CN}^- + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	10.05 - 0.5pH
12.3 < pH < 12.9	$\text{Cu}(\text{OH})_3^- + 4\text{CN}^- + 3\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 3\text{H}_2\text{O}$	13.125 - 0.75pH
PH > 12.9	$\text{Cu}(\text{OH})_4^{2-} + 4\text{CN}^- + 4\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$	16.35 - pH

TABLA 12. Datos para realizar diagrama de Existencia Predominio para Cu(II) pCN'=0.222

PH	Equilibrio Representativo $\text{Cu}^+_{(s)} \rightleftharpoons \text{Cu}^+$	PCu(II)'
PH < 3.172	$\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)} + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cu}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$	-9.1 + 2pH
3.172 < pH < 9.2	$\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)} + 4\text{HCN} \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$	2.7 + 4pCN' - 2pH
PH > 9.2	$\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)} + 4\text{CN}^- + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$	-34.1 + 4pCN' + 2pH

TABLA 13. Datos para realizar diagrama de Pourbaix pCN'=0.222 y pCu'=1

PH	Equilibrio Representativo $\text{Cu}(\text{II})^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{I})^+ \quad \text{PCu}'=1$	E''
PH < 3.172	$\text{Cu}^{2+} + \text{HCN} + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{CuCN}_{(s)} + \text{H}^+$	0.753 + 0.06pH - 0.06pCN'
3.172 < pH < 3.522	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 3\text{H}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{CuCN}_{(s)} + 3\text{HCN}$	1.461 - 0.18pH + 0.18pCN'
3.522 < pH < 4.822	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 2\text{H}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_2^- + 2\text{HCN}$	1.203 - 0.12pH + 0.12pCN'
4.822 < pH < 7.722	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + \text{H}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_3^{2-} + \text{HCN}$	0.927 - 0.06pH + 0.06pCN'
PH > 7.722	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{2-} + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$	0.477
PH	Equilibrio Representativo $\text{Cu}(\text{I})^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(0) \quad \text{PCu}''=1$	E''
PH < 3.522	$\text{CuCN}_{(s)} + \text{H}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(0) + \text{HCN}$	-0.074 - 0.06pH + 0.06pCN'
3.522 < pH < 4.822	$\text{Cu}(\text{CN})_2^- + 2\text{H}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(0) + 2\text{HCN}$	0.184 - 0.06pCu' - 0.12pH + 0.12pCN'
4.822 < pH < 7.722	$\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-} + 3\text{H}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(0) + 3\text{HCN}$	0.46 - 0.06pCu' - 0.18pH + 0.18pCN'
7.722 < pH < 9.2	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-} + 4\text{H}^+ + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(0) + 4\text{HCN}$	0.91 - 0.06pCu' - 0.24pH + 0.24pCN'
PH > 9.2	$\text{Cu}(\text{CN})_4^{3-} + 1\text{e}^- \rightleftharpoons \text{Cu}(0) + 4\text{CN}^-$	-1.298 - 0.06pCu' + 0.24pCN'

En la figura 33 las líneas continuas representan el cambio de potencial condicional del H₂O y de los sistemas M(I)/M(0) respecto al cambio en el pH. Las líneas punteadas delimitan el intervalo de pH donde una especie determinada del ion metálico correspondiente predomina (fracción molar mayor) con respecto a las otras especies cianuradas del mismo ion, o bien, la zona de límite de solubilidad (para el caso el CuCN_(s)). En la figura 33 se observa que el Cobre presenta tres especies iónicas cianuradas estables que forma la zona de corrosión del Cu⁰ y una especie cianurada sólida estable que forma la zona de pasiva del Cu⁰. Por otra parte, se observa que la reducción

termodinámica del H₂O a pH básicos (evolución de Hidrogeno), se presenta a potenciales menos negativos que los requeridos para reducir Cu(I). La reducción y oxidación del agua en estas condiciones experimentales, pH básicos, puede interferir en la estabilidad de la especie cianurada sólida de cobre lo que puede dar origen a la presencia de dos zonas de transpasivación del material.

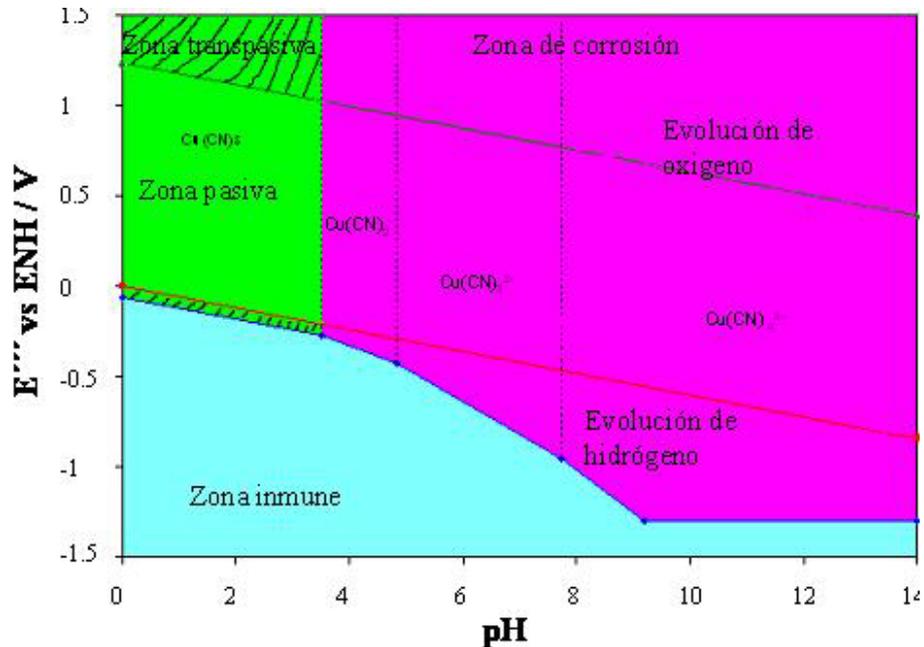


Figura 33. Diagrama tipo Pourbaix de las especies soluble e insoluble para el par redox Cu(I)/Cu⁰ (línea azul). Este diagrama se construyó con las constantes termodinámicas reportadas en la literatura y considerando constantes las concentraciones de 0.5M CN⁻, 0.1M Cu(I). En este diagrama se incluye el comportamiento de la reducción y oxidación del H₂O (línea roja y verde respectivamente).

Este tipo de diagramas es una herramienta que permite identificar las condiciones de pH y potencial, donde es seguro trabajar con un determinado metal sin que este sufra el proceso de corrosión en alguna de sus formas.

4.5.3 CURVAS DE POLARIZACIÓN [1][4][8].

Técnicas Electroquímicas

Aún cuando la aplicación de técnicas electroquímicas no es un hecho comúnmente aceptado en la industria, estas son una herramienta fundamental para determinar el mecanismo de corrosión de un metal con el medio ambiente. Las principales técnicas utilizadas son las que permiten la elaboración de curvas de polarización, adicionalmente está la técnica de Espectroscopia de impedancia electroquímica, que permite observar la separación de las contribuciones de las diferentes etapas al proceso global de corrosión.

A continuación se describe brevemente cada una de las técnicas electroquímicas usadas para en el estudio de la corrosión del acero al carbono SAE 1018 en un ambiente amortiguado de ácido acético, cloruros y H₂S reportado por M. A. Veloz, 2003.

Curvas de Polarización potenciodinámica.

En esta técnica, la perturbación utilizada es una diferencia de potencial con respecto a E_{corr} , a una velocidad dada. La respuesta que se observa es la corriente. El tamaño del escalón utilizado (velocidad de barrido) permite, en ocasiones, observar separación de los procesos involucrados. Gráficamente, se representan los valores de la corriente en función del potencial aplicado. Para un proceso que obedece la Ley de Ohm, un barrido lineal de potencial implica una respuesta lineal de corriente (figura 34).

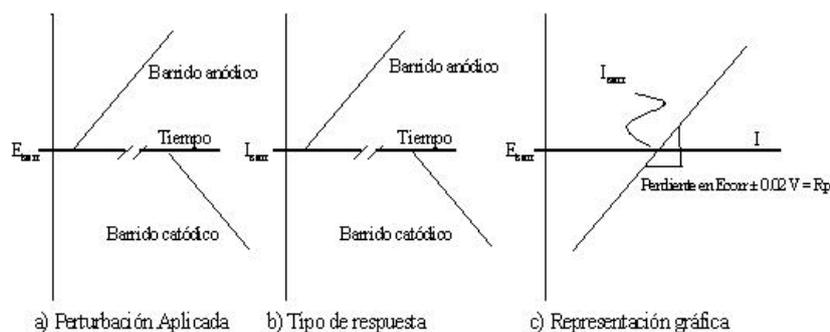


Figura 34 Esquematzación de la perturbación utilizada en la técnica de Polarización Potenciodinámica, el tipo de respuesta obtenida y una de las representaciones gráficas posibles para los resultados.

Curvas de Polarización Potenciostática.

Esta técnica se realiza mediante cronoamperometrías, la perturbación utilizada es una diferencia de potencial con respecto a E_{corr} , en un tiempo dado. La respuesta que se observa es la variación de la corriente durante dicho tiempo. Como primer efecto de la imposición del potencial se observa un salto en la corriente que corresponde a la carga de la doble capa y posteriormente se observa un aumento o caída de la corriente dependiendo de los fenómenos que ocurran bajo las condiciones impuestas. Una de las representaciones gráficas es presentar los valores obtenidos de corriente (a diferentes tiempos de estabilización) para cada uno de los potenciales aplicados (ver figura 35).

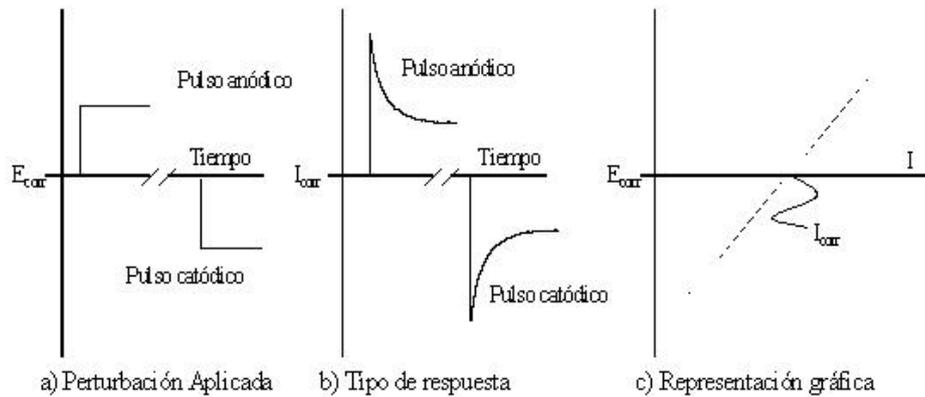


Figura 35 Esquemización de la perturbación utilizada en la técnica de Polarización Potenciostática, el tipo de respuesta obtenida y una de las representaciones gráficas posibles para los resultados.

Curvas de Polarización Galvanostática.

Para esta técnica se utilizan las cronopotenciometrías; la perturbación que se utiliza es la imposición de una corriente, ya sea de oxidación o reducción, en un tiempo dado. En este caso, la respuesta observada es la variación y estabilización del potencial durante dicho tiempo. De manera similar a la técnica anterior, como primer efecto de la imposición de la corriente se observa un salto en el potencial y posteriormente una estabilización del mismo. Una de las representaciones gráficas es presentar los valores obtenidos de potencial (a diferentes tiempos de estabilización) para cada una de las corrientes aplicadas (ver figura 36).

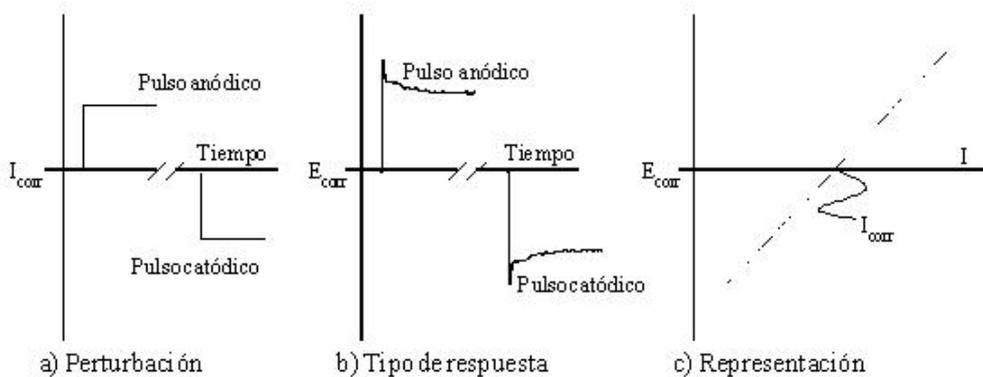


Figura 36 Esquemización de la perturbación utilizada en la técnica de Polarización Galvanostática, el tipo de respuesta obtenida y una de las representaciones gráficas posibles para los resultados.

4.5.4 DIAGRAMAS DE EVANS [1][4].

Los resultados de las curvas de polarización provenientes de las técnicas electroquímicas a corriente directa (DC) se presentan como E en función del log I (diagramas de Evans, figura 37), de esta manera se pueden obtener parámetros de corrosión tales como la corriente de corrosión (i_{corr}) y las pendientes de Tafel, b_a y b_c (figura 35).

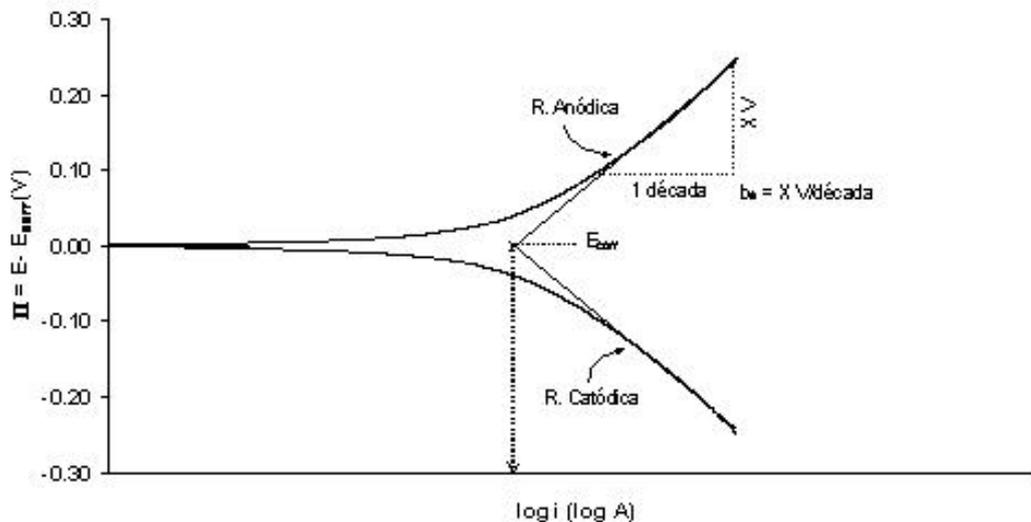


Figura 37 Metodología para extraer las pendientes de Tafel, el potencial de corrosión y la corriente de corrosión, gráficamente.

Estos diagramas nos proporcionan información del proceso de corrosión a través de dos aproximaciones:

1.- Aproximación a Bajo Campo [8].

Para valores bajos de sobrepotencial η ($|\eta| < 0.05 \text{ volt}$) donde la ecuación de Butler-Volmer se puede simplificar como:

$$i = i_0 \eta n F / RT$$

$$\eta = i RT / i_0 n F$$

Así que para sobrepotenciales pequeños la curva se puede considerar lineal y cumple con la ley de Ohm:

$$\eta = i R.$$

2.- Aproximación a Alto Campo [8].

Esta aproximación se aplica para cuando $\eta \geq 0.100 \text{ volt}$ y cumple con la ley de Tafel:

$$\eta = a \pm b \log i \text{ (neta)}$$

4.5.5 MEDIDAS DE IMPEDANCIA [2].

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica.

Esta técnica A.C. es una poderosa herramienta, adecuada para la caracterización *in-situ* de materiales en ambientes corrosivos ya que la perturbación utilizada puede ayudar a separar las contribuciones de las diferentes etapas involucradas en el proceso global. Para este trabajo, la perturbación impuesta (ver figura 38a) es una señal sinusoidal (con amplitud conocida) de potencial en un intervalo de frecuencias donde se llevan a cabo la mayoría de los procesos electroquímicos. Como resultado de ello, se obtiene un flujo de corriente a través del sistema cuyo valor está determinado por el mecanismo de las reacciones que se llevan a cabo en él. Puesto que se impone una señal sinusoidal, la respuesta obtenida es sinusoidal también aunque desfasada de acuerdo al comportamiento del sistema al ser polarizado de esta manera. La relación entre el potencial aplicado y la corriente resultante se conoce como Impedancia (Z), la cual es similar a una relación resistencia-corriente-potencial de un circuito DC. La impedancia es una cantidad vectorial con magnitud $\Delta E/\Delta i$ y un ángulo de fase, ϕ . A partir de estos datos es posible construir curvas complejas con coordenadas polares, cuya abscisa se denomina impedancia real y la ordenada es la impedancia imaginaria. Como representación gráfica se puede presentar los valores de la impedancia imaginaria en función de la impedancia real (diagramas de Nyquist, ver figura 38c) obtenidos para cada frecuencia evaluada. O bien, el valor del módulo y el ángulo de fase en función del logaritmo de la frecuencia; a éstos se les denomina diagramas de Bode (ver figura 39). El cálculo de parámetros de corrosión se puede realizar mediante el análisis de los diagramas de Nyquist obteniendo el diámetro del semicírculo y el ángulo de depresión presentado por el mismo (esta es una de las formas de análisis más simplistas, pero en ocasiones la menos adecuada, ver figura 40). Otra forma de análisis es mediante el ajuste de los resultados experimentales a la respuesta obtenida por un circuito eléctrico equivalente, donde parámetros tales como la resistencia a la transferencia de carga estarían explícitos.

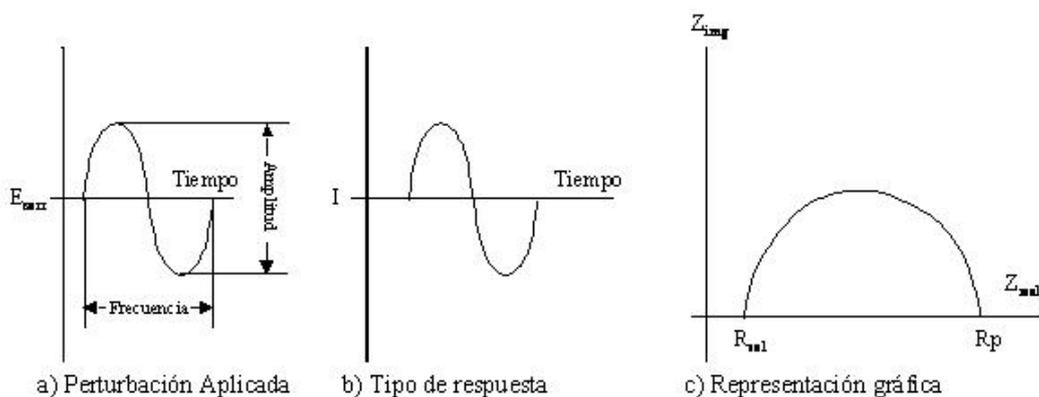
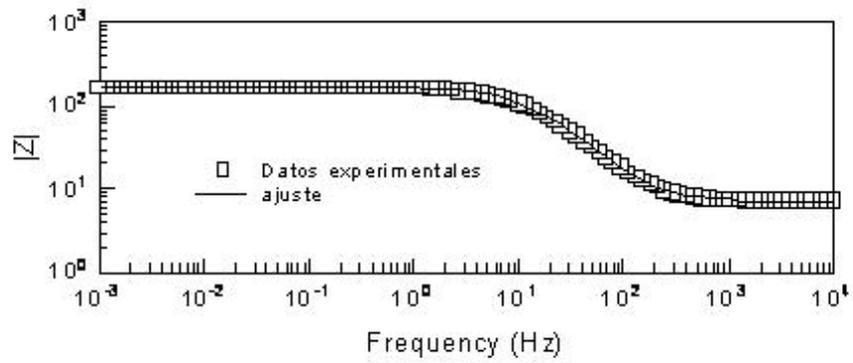
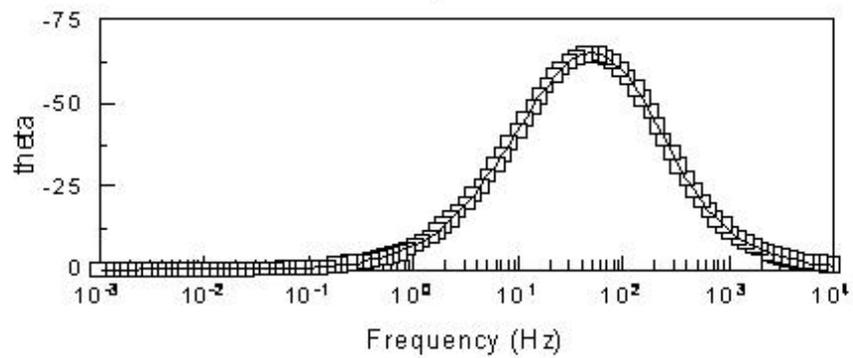


Figura 38 Esquematación de la perturbación utilizada en la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica, el tipo de respuesta obtenida y una de las representaciones gráficas (diagrama de Nyquist) posibles para los resultados.



a)



b)

Figura 39 Diagramas de Bode para representar los resultados experimentales: a) módulo; b) ángulo de fase.

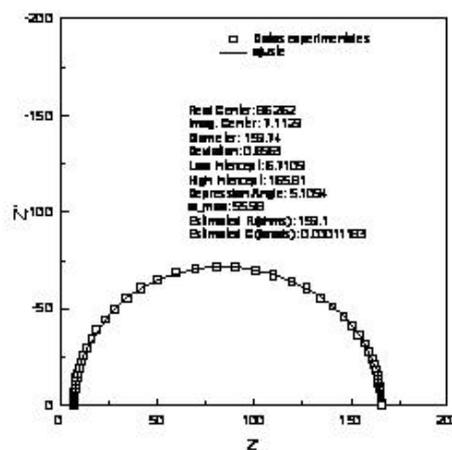


Figura 40 Ejemplo del Ajuste de los resultados experimentales a un semicírculo, los valores estimados se indican en la figura.

4.5.6 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN.

La Resistencia de polarización de técnicas electroquímica de DC, R_p , se obtiene a partir de las curvas I-E construidas con dichos resultados de las curvas de polarización (figura 41).

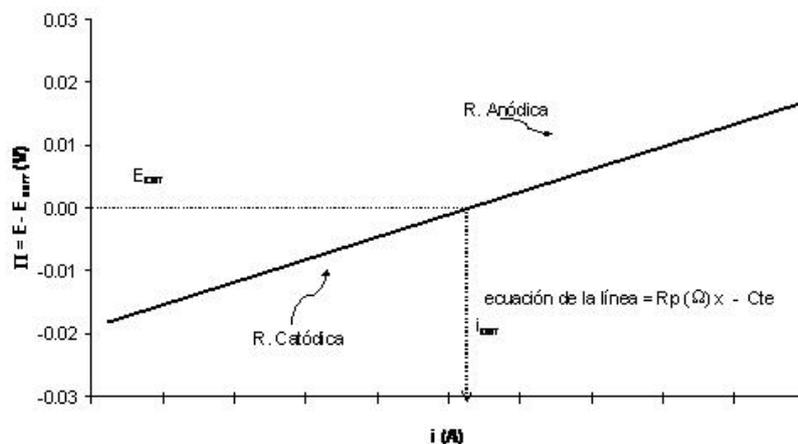


Figura 41 Metodología para extraer la Resistencia de Polarización gráficamente.

Así que para sobrepotenciales pequeños la curva se puede considerar lineal. La pendiente de la curva de polarización ($d\eta / di$) tiene dimensiones de una resistencia eléctrica y se conoce como resistencia de polarización R_p , que es la resistencia de la transferencia de carga. Un valor de i_0 grande significa un valor de resistencia de transferencia de carga pequeño y una velocidad de reacción grande o viceversa.

La Resistencia de polarización de la técnica electroquímica AC, R_p , se obtiene directamente del diagrama Nyquist y Bode en el límite a frecuencias bajas ó a través del ajuste de los resultados experimentales a la respuesta obtenida por un circuito eléctrico equivalente.

4.5.7 PRUEBAS DE CORROSIÓN.

Técnicas de evaluación tradicionales:

Prueba de Herrumbre.

Este tipo de evaluación de la velocidad de corrosión es más bien cualitativa y se lleva a cabo de acuerdo con el método técnico NACE TM. Para ello se preparan soluciones agresivas y se ponen en contacto con cupones cilíndricos que se encuentran rotando (ver figura 42a). Después de un determinado tiempo se adicionan los inhibidores de corrosión y se dejan en contacto con los testigos por otro tiempo. Una vez transcurrido éste, se sacan los cupones y se observa el avance de la herrumbre en todo el cuerpo de los mismos (ver figura 42b). La apreciación es meramente visual y se reporta en porcentaje de recubrimiento de herrumbre.



Figura 42. Método NACE TM para la evaluación de la corrosión. a) Equipo utilizado para la prueba de herrumbre, b) testigos de corrosión.

Pérdida de Peso.

Esta técnica es la más utilizada tanto en laboratorio como en la industria y se lleva a cabo mediante la colocación de un testigo metálico - de dimensiones y peso conocido - en contacto con un ambiente corrosivo. En laboratorio se utiliza el método de la rueda dinámica (ver figura 43), también conocido como pruebas de botella. El tiempo de exposición del testigo varía desde 48 hrs. (en laboratorio) hasta 1 mes (en campo). La evaluación de la velocidad de corrosión se hace a través de una comparación entre el peso del testigo antes y después de su exposición, previa limpieza de los productos de corrosión.

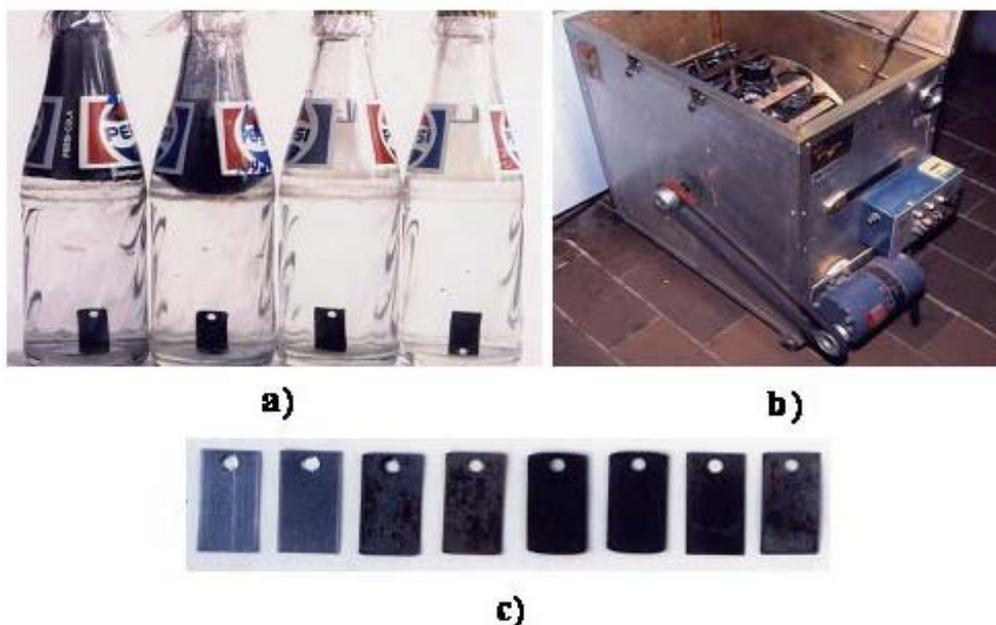


Figura 43. Método de la Rueda dinámica: a) Disposición de los testigos de corrosión en botellas que contienen el medio corrosivo, b) Equipo utilizado y c) testigos de corrosión.

Resistencia Eléctrica.

Esta técnica es ampliamente utilizada en campo. El equipo requerido es relativamente muy sencillo y portátil (modelo CK-3 de CORROSOMETER®, figura 44b), lo que lo hace versátil para uso general en campo o en laboratorio. El método involucra la inserción de una probeta de resistencia eléctrica en cualquier medio corrosivo a ser estudiado, por medio de un instrumento de medición. Cualquier número de probetas corrosimétricas (fig. 44a) puede ser usado con un simple instrumento, la conexión a la probeta se requiere únicamente al momento en que se haga la lectura.

La pérdida de metal se mide en el indicador de esfera digital directamente, en divisiones de esfera (0-1000) las cuales pueden ser convertidas a pérdida de peso directamente por comparación con una constante específica (el span) de cada probeta.

La operación del sistema de corrosómetro está basada en el hecho de que la conductividad de la mayoría de los metales es muy grande, mientras que la conductividad de los óxidos metálicos es despreciable, por comparación. Cuando el elemento sensor metálico se corroe el proceso de corrosión convierte al metal en no metal (por ejemplo óxido metálico), el área transversal del metal decrece y consecuentemente la resistencia eléctrica del elemento sensor metálico aumenta. El circuito del corrosómetro utiliza este cambio de resistencia para indicar la pérdida de metal sobre una superficie expuesta.

La resistencia eléctrica de este elemento expuesto no es medida directamente en Ohms por el circuito del corrosómetro. En lugar de esto, hay un segundo elemento de chequeo localizado cerca del elemento expuesto y hecho del mismo metal o aleación, esta conectado en serie con el primero, y los dos son parte de un circuito de puente. El segundo elemento de chequeo está protegido del ambiente corrosivo y por lo tanto mantiene su área transversal original. La relación de la resistencia del elemento expuesto a la del elemento protegido se determina, y los cambios en esta relación de resistencias se transportan directamente a unidades de corrosión por el instrumento. Usando un circuito que mide la relación de las dos resistencias, las mediciones se hacen esencialmente independientes de la corriente usada para energizar el puente. De la misma manera, ya que los cambios de temperatura afectan la resistencia de ambos elementos (el protegido y el expuesto) de la misma manera, la relación de resistencias y la lectura del medidor son substancialmente independientes de la temperatura del ambiente.

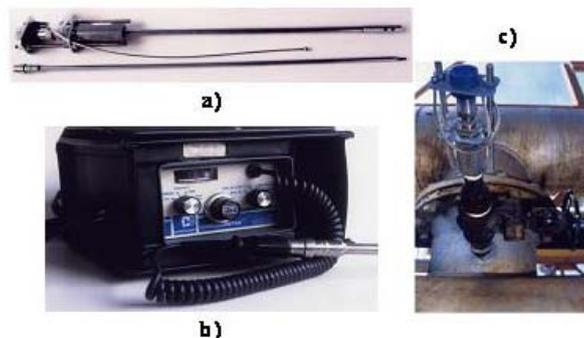


Figura 44. Resistencia eléctrica: a) probeta corrosimétrica, b) equipo de medición y c) disposición de las probetas corrosimétricas en la industria.

A pesar de las ventajas que presenta este método de evaluación de la corrosión, la exactitud está sujeta a parámetros como el tiempo de exposición (aunque son medidas instantáneas, se requiere más de dos días y se obtienen velocidades de corrosión promedio), el tipo de material del elemento (probeta corrosimétrica), el tipo de ambiente corrosivo y por consecuencia el tipo de productos de corrosión (si se tienen productos de corrosión conductores, entonces el principio del equipo no es válido).

4.5.8 MEDICIÓN DE LA CORROSIÓN EN PLANTAS DE PROCESO [11].

La industria petrolera cuenta con procedimientos de trabajo que tiene la finalidad de controlar y prevenir la corrosión en sus quipos de proceso. Estos procedimientos son revisados continuamente para realizar mejoras en ellos y prever los daños que ocasiona la corrosión.

Los nombres de algunos de los procedimientos son mostrados en los siguientes esquemas en la siguiente tabla.

TABLA 14. Documentos normativos vigentes GPASI.

Clave	Descripción	Rev.	Fecha
SP-GAPASI-IT-00001	Procedimiento para revisar la construcción de calderas de potencia por parte de las superintendencias de inspección técnica y seguridad industrial de las refinerías.	2	11-Jun-1996
GPASI-IT-00002	Procedimiento para calculo por presión interna del espesor mínimo en recipientes.	1	16-abr-1979
GPASI-IT-00003	Procedimiento para la inspección de recipientes a presión de almacenamiento de gas licuado del petróleo.	1	Oct-1986
GPASI-IT-00004	Procedimiento para la revisión de tanques de almacenamiento atmosférico.	0	Ene-1968
SP-GAPASI-IT-00005	Procedimiento para efectuar la inspección de cambiadores de calor en instalaciones de PEMEX refinación.	3	11-Jun-1996
GPASI-IT-00006	Criterios generales para la inspección de ductos.	3	Mar-1995
SP-GAPASI-IT-00007	Procedimiento para el calculo de espesor de retiro de tubos de agua de calderas de potencia de circulación natural y espesor mínimo requerido para tubos nuevos	1	15-Dic-1997
DG-ASIPA-IT-00008	Procedimiento para el calculo de espesores de retiro para tuberías, válvulas y conexiones metálicas, empleadas en el transporte de fluidos.	1	Sep-2001
DG-GPASI-IT-00009	Procedimiento para la evaluación, inspección y reparación de cambiadores de calor enfriados por aire.	1	30-Dic-1996
DG-GPASI-IT-00011	Procedimiento para la inspección por corrientes EDDY en tubos de material no ferromagnéticos instalados en equipos de intercambio de calor.	1	30-Ene-1996
DG-GPASI-IT-00012	Procedimiento para la inspección y mantenimiento de válvulas de presión vacío y arrestadores de flama.	1	21-Abr-1998
GPASI-IT-00020	Procedimiento para realizar la inspección de calderas de potencia.	0	Jul-1994
GPASI-IT-	Procedimiento para realizar la inspección preventiva de	0	Jul-1994

00021	calderas de potencia en operación.		
DG-GPASI-IT-00202	Procedimiento para la inspección de tubería recién construida antes de operar.	2	23-Dic-1997
DG-GPASI-IT-00204	Procedimiento para el registro, análisis y programación de la calibración preventiva de espesores.	6	12Jun-1998
DG-GPASI-IT-04904	Norma para la administración de cambios en los centros de trabajo.	3	10-Nov-1998
DG-GPASI-IT-05201	Procedimiento para la investigación y reporte de incidentes.	5	15-May-2002
DG-GPASI-IT-00204	Procedimiento para el control de corrosión e incrustación en torres de enfriamiento.	3	28-Jun-1996
GPASI-IT-004002	Procedimiento para efectuar el diagnostico sobre el estado físico de equipos y tuberías en unidades de proceso, servicios auxiliares y almacenamiento.	2	Ene-1994
SP-GPASI-IT-05203	Procedimiento para la aplicación y control de medidas anticorrosivas en la sección de fraccionamiento y recuperación de vapores de las plantas catalíticas.	2	30-Nov-1995

De los procedimientos antes mostrados se puede observar que muchos de ellos están dirigidos a condiciones específicas de equipos de proceso con diferentes técnicas de evaluación de la corrosión que van desde la inspección por herrumbre hasta la inspección de pérdidas de espesor con diferentes métodos y equipos. De estos últimos el procedimiento para el registro, análisis y programación de la calibración preventiva (GPEI-IT-0204, Revisión 4, Nov. 1985), a través de equipos de ultrasonido, es una de las formas que se puede aplicar en cualquier industria o en el ámbito cotidiano para la evaluación de la corrosión de materiales expuestos a un medio ambiente determinado.

Dicho procedimiento se lista a continuación:

1. ALCANCE

1.1. Este procedimiento establece las actividades necesarias para poder llevar a efecto la programación, el análisis y el control de la calibración preventiva en los circuitos de proceso y tuberías de integración de proceso, así como en equipos cilíndricos horizontales y verticales, filtros, reactores, torres, acumuladores, tanques de almacenamiento, cambiadores de calor, etc., siempre y cuando dichos equipos se consideren seccionados en partes con velocidades de desgaste homogéneas.

1.2. Este procedimiento no es aplicable para los casos mencionados en el punto 3.4.

2. DEFINICIONES Y CONCEPTOS

Con el fin de normalizar el lenguaje utilizado y evitar confusiones, se hacen las siguientes definiciones de los conceptos que se manejan más frecuentemente en este instructivo.

2.1. **Circuito.-** Se considera como "circuito", el conjunto de líneas y equipos que manejen un fluido de la misma composición pudiendo variar en sus diferentes partes las condiciones de operación.

2.2. Unidad de control.- Los circuitos se dividirán en "unidades de control".

Estas últimas se definen como secciones de circuitos que tengan una velocidad de corrosión más o menos homogénea. En el caso de tuberías, la unidad de control será la línea. En el caso de equipos, procédase como se Indica en 2.2.2.

2.2.1. Línea.- Se considera como "línea" al conjunto de tramos de tubería y accesorios que manejen el mismo fluido a las mismas condiciones de operación. Nótese que normalmente esto se verifica para el conjunto de tubería, localizado entre un equipo y el siguiente en la dirección de flujo.

2.2.2. Equipos.- Son todos aquellos dispositivos(recipientes, cambiadores, bombas, etc.) que conjuntamente con las líneas integran los circuitos.

Cabe hacer notar que éstos por lo general, se encuentran sujetos a corrosión variable, por lo que las unidades de control en este caso podrán ser equipos enteros o partes de los mismos que presenten similares condiciones de corrosión. Como reglas generales para seccionar los equipos en unidades de control, tomar las siguientes:

- A. Cuando en un recipiente, las velocidades de corrosión se puedan considerar homogéneas, o bien, éstas sean menores de 0.020" por año (equipos no críticos),se tomará como unidad de control el recipiente entero.
- B. En cambiadores de calor (haz de tubos), se considerarán dos unidades de control: cuerpo y carrete.
- C. En cambiadores de calor (horquilla), se tomarán dos unidades de control. 1o., el conjunto de piezas que manejan el fluido frío y2o., el conjunto de piezas que manejan el fluido caliente.
- D. En torres de destilación con velocidades de corrosión "críticas", seccionarlos en tantos tramos como sea necesario para tener unidades de control con velocidad de corrosión homogénea, por ejemplo, en la torre de destilación primaria, considerar: fondo del plato 3 hacia abajo; a continuación, zona de carga de plato 3 a plato 10, a continuación, zona de carga central de plato 10 a plato 23, y a continuación zona del domo, del plato 23 a la salida de vapores.
- E. Los recipientes y torres con forro Interior anticorrosivo (lainas, clad u overlaid, pinturas, etc.) considerarlas como una sola unidad de control. Cuando este recubrimiento sea parcial, tomar dos unidades de control: zona protegida y zona sin protección.
- F. En tanques verticales de almacenamiento esferas y esferoides, tomar una unidad de control por anillo.
- G. Puede haber recipientes horizontales o verticales con zonas donde se concentra la corrosión, por ejemplo, acumuladores donde hay zona líquida y zona de vapores, o bien, otro de Interfaces donde por su elevada velocidad de corrosión en una de ellas, conviene dividir en varias unidades de control el equipo.

2.3. Pieza de tubería.- Es el tramo recto de tubería o accesorio (tee, codo, reducción, válvula, etc.) colocado entre bridas, soldaduras o roscas. El conjunto de "piezas de tubería" integrará, por lo tanto las "líneas"

2.4. Posición o punto de calibración.- Es el lugar donde se coloca el "transducer" para efectuar una calibración.

- 2.5. **Nivel de calibración.**- Es el conjunto de posiciones de calibración que se efectúan en un mismo sitio de una tubería o equipo. Por ejemplo, las cuatro calibraciones que se hacen en una tubería de diámetro usual, las calibraciones que se hacen en un recipiente o cambiador alrededor de una boquilla (4 ó más). etc. Lo anterior, de acuerdo con los anexos números 1, 2, 3 Y 4.
- 2.6. **Intensidad de calibración.**- Se considera como tal, la cantidad de niveles de calibración efectuados en cada unidad de control, ya se trate de tubería o equipo.
- 2.7. **100 % de calibración.**- Toda tubería en la que se haya calibrado como mínimo un nivel de calibración por cada una de las piezas que lo componen, se considerará como calibrada 100%. En el caso de equipos, el 100% de calibración consistirá en calibrar todas las posiciones posibles de las marcadas en el dibujo del mismo. Para marcar estas posiciones, cada equipo deberá estudiarse en particular, auxiliándose con lo recomendado en los anexos números 1, 2, 3 y 4.
- 2.8. **Periodicidad de calibración.**- Se considera como tal el tiempo que transcurre entre una fecha de calibración y la siguiente consecutiva. Cuando se cuente con una sola calibración completa de acuerdo a este procedimiento, la segunda o siguiente deberá efectuarse en un lapso de tiempo que no exceda de 3 años después de la fecha de la primera calibración.
- 2.9 **Velocidad de desgaste.**- Como tal se considera la rapidez con la cual disminuye el espesor de una pared metálica. Ordinariamente, se calcula comparando los espesores obtenidos en calibraciones efectuadas en dos fechas consecutivas.
- 2.10. **Espesor remanente.**- Es la diferencia de espesores entre el obtenido por calibración y el límite de retiro.
- 2.11. **Líneas y equipos críticos.**- Son aquéllos, cuyas velocidades de desgaste exceden el valor de 20 milésimas de pulgada por año (20 mpa). Cuando no se tenga información sobre la velocidad de desgaste se tomarán como críticas aquellas unidades de control que de acuerdo con su historial hayan presentado problemas de desgaste habiendo tenido que repararse o reponerse. En el caso de plantas nuevas considerará el comportamiento de unidades de control equivalentes de otras plantas similares.
- 2.12 **Vida útil estimada (V.U.E.).**- Es el tiempo supuesto que deberá transcurrir antes de que la unidad de control llegue a su límite de retiro.
- 2.13. **Fecha de próxima calibración (F.P.C.).**- Es la fecha en la cual deberá efectuarse la siguiente calibración de la unidad de control, de acuerdo al análisis.
En el caso particular de emplazamientos vencidos no cambiados y tomando en cuenta su velocidad de desgaste y su criticidad, se deberá programar su fecha de próxima calibración a un lapso de tiempo de un año como máximo.
- 2.14. **Fecha de retiro probable (F.R.P.I.).**- Es la fecha en la cual se estima que deberá retirarse la unidad de control por haber llegado al término de su vida útil.
- 2.15. **Límite de retiro.**- De acuerdo con la norma de seguridad Pemex AVIII-4, es el espesor con el cual deben retirarse los tramos de tubería de un servicio determinado.

- 2.16. **Calibración preventiva.**- Es el trabajo de medición sistemática de espesores de pared en tuberías y equipos. Esta medición generalmente se lleva a cabo mediante técnicas ultrasónicas, pudiéndose también utilizar métodos físicos directos, radiográficos, etc.
- 2.17. **Análisis de la calibración.**- Es el análisis preliminar a uno más formal que personal de inspección y seguridad de un sector hace del conjunto de espesores, obtenidos con el procedimiento y para los fines que se indicarán más adelante.
- 2.18. **Vaciado de calibraciones.**- Es el trabajo que se ejecuta al pasar los espesores obtenidos en el campo a un registro permanente (llamado también "récord de calibraciones").
- 2.19. **Análisis de la estadística.**- Es el análisis formal que se ejecuta a partir de los datos asentados en el registro de calibraciones, para obtener las fechas de la siguiente calibración y de retiro probable de tuberías y equipos.
- 2.20. **Recalibración de puntos sospechosos.**- Es la recalibración de los puntos, cuyos valores de acuerdo al análisis preliminar de la calibración, arrojan dudas sobre su veracidad por observarse "disparados" dichos valores con respecto a los que por lógica sería dable encontrar. Se incluyen aquí aquellos casos donde por una u otra causa no se pudo obtener ningún valor.
- 2.21. **Saneamiento de la estadística.**- Es el trabajo consistente en recalibrar aquellos equipos, líneas, piezas, etc., que de acuerdo con el análisis de la estadística tengan fecha de retiro probable vencida, así como la recalibración de aquellos puntos, cuya velocidad de desgaste sea muy diferente al típico obtenido para la línea o equipo de que se trate.
- 2.22 **Planeación.**- Se considerará como tal, la elaboración del programa con los dibujos de unidades de control necesarios para efectuar la calibración preventiva en una fecha determinada.
- 2.23. **Programación de la calibración preventiva.**- Se considerará como tal la elaboración del programa anual de calibración preventiva en el cual se programará por línea y equipo la fecha en que deberá calibrarse cada unidad de control.
- 2.24. **Calibración a planta parada.**- Es la calibración de líneas y equipos que se efectúa durante su inactividad, principalmente durante reparaciones, para verificar los resultados obtenidos en operación para llevar a cabo la recalibración de puntos sospechosos que no hayan podido efectuarse inmediatamente después de la calibración preventiva, para calibrar equipos por el interior, líneas inaccesibles, así como otras piezas donde no sea factible su calibración en operación por otras causas, tales como: alta temperatura, vibración, incrustación, etc.
- 2.25. **Prueba a martillo.**- Es la prueba que se efectúa golpeando con un martillo las tuberías y equipo, con el objeto de determinar la existencia de zonas de pared adelgazadas y su extensión, verificar los resultados obtenidos con aparatos ultrasónicos y tratar de detectar formas de deterioro diferentes al desgaste generalizado.

3. GENERALIDADES.

3.1 Los trabajos de calibración preventiva en el campo y los de análisis de la estadística de calibración, constituyen un procedimiento cíclico, ya que cada uno de ellos aporta los datos necesarios para la ejecución del otro, tal y como se describe en la secuencia siguiente:

- A. Los datos obtenidos en la calibración preventiva se registrarán en los formatos GPEI-1-25, con que para tal efecto se cuenta y en los cuales se tendrá recopilada la Información de anteriores calibraciones. El conjunto de estos formatos constituye el "récord de calibración"
- B. Se procede al análisis de los datos registrados, obteniéndose la Información de las fechas en que deberá efectuarse la nueva calibración y en que se estima deberán reemplazarse las piezas de acuerdo a su vida útil, así como su velocidad de desgaste. Para este paso, se utiliza la forma GPEI-1-26, existente.
- C. Con la información obtenida del análisis, se procederá a la programación de la siguiente calibración, en base a la criticidad de las líneas o equipos, asentándola a continuación en la forma GPEI-1-27.
- D. Cada mes, se revisará la programación de las formas GPEI-1-27 y seleccionando los dibujos e isométricos que corresponda en esa fecha, se planeará la calibración de dicho mes.
- E. Al ejecutar en el campo el plan de calibración se generarán nuevos datos, los que al registrarse repetirán el ciclo.

3.2 La Calibración Preventiva es aplicable a cualesquier equipo o línea, ya sea dentro de las instalaciones del centro de trabajo o fuera de él, ya que la información que proporciona (medición de espesores) es útil para conocer el estado en que se encuentran en el momento de llevarla a efecto. Una serie de mediciones a una pieza dada, comparadas adecuadamente, proporcionan información del comportamiento de la pieza en el medio y condiciones en que presta servicio. Las excepciones a la aplicación de este procedimiento, se mencionan en la sección 3.4.

3.3 Sin embargo, aunque su aplicabilidad es amplia, no se puede hacer ésta indiscriminadamente, ya que las características de los equipos y líneas, así como las de los fluidos que manejan establecen diferencias en su comportamiento, por lo que se han señalado lineamientos para jerarquizar su aplicación y puede decirse en términos generales que la calibración preventiva cubre las siguientes etapas a enumerar en orden de importancia:

- A. Líneas que manejan hidrocarburos y productos químicos o petroquímicos en las plantas de proceso y líneas de proceso en general.
- B. Equipos en plantas de proceso.
- C. Líneas de campo que interconectan plantas de proceso y manejan hidrocarburos y productos químicos o petroquímicos.
- D. Tanques y recipientes en las áreas de almacenamiento.
- E. Instalaciones de fuerza.
- F. Líneas de campo a y de áreas de tanques que manejan cargas y productos de las unidades de proceso.
- G. Líneas de aire, vapor yagua, tanto en áreas de proceso, como de almacenamiento.

H. Equipos y líneas que manejan hidrocarburos y productos químicos o petroquímicos en Instalaciones fuera del centro de trabajo pero bajo su jurisdicción.

NOTA: Además en cada etapa se deberán jerarquizar los equipos y líneas en críticos y no críticos.

3.4. Excepciones y limitaciones

A. Las excepciones a la aplicación del análisis de la Calibración Preventiva se tienen en aquellos equipos, que por sus características no pueden sujetarse a un programa independiente de sus fechas de reparación, y son los siguientes:

A.1. Tuberías de calentadores.

A.2. Fluxería de calderas.

A.3. Haces de tubos de cambiadores de calor.

A.4. Accesorios interiores de recipientes, tales como; platos de torres de destilación, ciclones en reactores, etc.

B. Así también, este procedimiento, aunque es aplicable a los casos de tuberías y equipos sujetos a corrosión de tipo generalizada, no es representativo para los siguientes casos:

B.1. Tuberías y equipos con corrosión puntual (pittings) o con desgaste muy irregular, como puede ser el producido por erosión. En estos casos, el presente procedimiento nos deberá servir como un método auxiliar.

B.2. Tuberías y equipos sujetos exclusivamente a corrosión Íntergranular, transgranular, fallas metalúrgicas, fallas por fatiga y otras formas de deterioro similares, en donde este procedimiento no es aplicable en lo absoluto.

4. INTEGRACION DE LA ESTADISTICA DE CALIBRACION PREVENTIVA.

La estadística de calibración de líneas y equipos, se deberá Integrar de la manera Siguiente:

4.1. Las carpetas de archivo de estadística de calibraciones se agruparán por planta o unidad de proceso.

4.2. Cada planta o unidad de proceso estará dividida en circuitos individuales.

4.3. Cada circuito estará dividido en unidades de control.

4.4. De cada unidad de control se deberá tener lo siguiente:

4.4.1. Dibujo Isométrico de la línea o dibujo del equipo, en donde se indique claramente soldaduras y puntos de calibración, los cuales además deberán tener los datos de condiciones de operación, especificación del material, cédula en su caso, diámetro, espesor original y límite de retiro correspondientes a la línea o equipo.

4.4.2. Hoja de registro de calibraciones (formato GPEI-1-25) para cada uno de los dibujos. En estos formatos se irán registrando los espesores obtenidos en la calibración.

4.4.3. Hoja de resultados del análisis de calibraciones, tales como: estimaciones de vida útil esperada, fecha de retiro probable y fecha de próxima calibración (Formato GPEI-1-261).

4.5. Se deberá tener al inicio de la estadística, el censo de todas las unidades de control de los circuitos y equipos de la planta o instalación.

5. PREPARATIVOS PARA LA CALIBRACIÓN.

5.1. Programa general de calibración.-

Se deberá mantener actualizado un programa de calibración de tipo semigráfico, utilizando el formato GPEI-1-27.

Como ejemplo se adjunta un formato lleno (Anexo No. 51).

5.1.1. En dicho programa se indicará la fecha de próxima calibración (FPC) con un cuadro de preferencia en rojo en la columna correspondiente a la fecha en que deberá calibrarse nuevamente la línea o unidad de control. Esta fecha de próxima calibración (FPC) se determina como se indica más adelante, y no podrá ser mayor de cinco años aunque el resultado del análisis dé una fecha mayor.

5.1.2. En los casos en que la FPC caiga fuera de la hoja de programación, se indicará con una flecha → en el extremo derecho de la hoja, arriba de la cual se deberá anotar la fecha de próxima calibración. Cuando la hoja de programación quede obsoleta, deberán vaciarse estos últimos datos a la hoja nueva que se elabore.

5.2. Planeación de la calibración.

5.2.1. Cada mes, se revisará el programa de calibración y por cada planta donde corresponda calibrar en ese lapso, se preparará un juego de isométricos y/o dibujos de equipo, mismo que se usará en la calibración para localizar los niveles y anotar los resultados, Esto constituirá el "plan de calibración",

5.2.2. En cada Isométrico o dibujo, se marcarán los niveles que sean seleccionados para calibrar en dicha fecha (en líneas críticas serán todos los niveles y bastará con escribir la palabra "crítico").

5.2.3. Con el programa general de calibración, se pueden elaborar los programas de calibración anual y mensual, con objeto de controlar los avances.

5.3. Selección de la intensidad de calibración.

5.3.1. Las unidades de control críticas, serán todas aquéllas que tengan una velocidad de desgaste mayor de 20 MPA.

5.3.2. Para establecer la velocidad de desgaste de una unidad de control, con objeto de poder determinar su criticidad, el análisis, deberá hacerse a partir de los valores de dos calibraciones completas al 100% de sus puntos, y dichas calibraciones deberán haberse efectuado con un intervalo de tiempo mínimo de un año. Esto se denominará calibración inicial.

5.3.3. La calibración de las unidades de control críticas "deberá efectuarse siempre al 100%, es decir, deberán incluirse todos los puntos de control, cada vez que como resultado del análisis tenga que ser calibrada la línea o unidad de control de que se trate.

5.3.4 Para establecer el volumen de calibración dentro del grupo de unidades de control no críticas se considerarán tres subgrupos:

GRUPO 1.- De 16 a 20 MPA 33% (1 si 2 no)

GRUPO 2.- De 10 a 15 MPA 25% (1 si 3 no)

GRUPO 3.- De 0 a 9 MPA 100%

- A. Grupo 1.- Las unidades de control que pertenezcan a este grupo, deberán ser calibradas en un 33% y para este fin, se seleccionarán como puntos de control uno sí y dos no (Ejemplo: los niveles de calibración: 1,4, 7,10,13 y 16, etc.).
- B. Grupo 2.- Las unidades de control pertenecientes a este grupo, se deberán calibrar en un 25% y para este fin, se seleccionarán como puntos de control uno sí y tres no (Ejemplo: los niveles de calibración: 1, 5, 9, 13,17 y 21, etc.).
- C. Grupo 3.- Estas unidades de control, se deberán calibrar en un 100% de sus niveles de calibración seleccionados en una distribución uniforme y con base a la experiencia, deberán ser los que tengan mayores posibilidades de desgaste.
- D. La cantidad mínima de niveles será de 8, a calibrar en una línea, por lo tanto, en ninguno de los casos se permitirán menos de ocho niveles de calibración por unidad de control.
- E. El volumen de calibración señalado al inicio de este párrafo, no será aplicable para líneas cortas con ocho niveles de calibración. En este caso, siempre se calibrarán en un 100%

5.4. **Calibración.-** Con el juego de dibujos así preparado, se procederá a efectuar la calibración.

6. ANALISIS PREVIO DE CALIBRACIONES.

- 6.1. El análisis previo de calibraciones, deberá ser efectuado invariablemente por el ingeniero jefe del sector lo más pronto posible, de preferencia inmediatamente después de haber recibido los valores de las calibraciones para lo cual deberá seguirse la siguiente secuencia:
 - 6.1.1. Verificar que la unidad de control haya sido calibrada de acuerdo a las instrucciones ya la intensidad fijada.
 - 6.1.2. Revisar las calibraciones obtenidas comparándolas con el límite de retiro y con la calibración anterior, con objeto de comprobar si todos los puntos se comportan similarmente, efectuando la comprobación inmediata de aquellas calibraciones "disparadas" a favor o en contra, para así poder determinar la causa de los "disparos" en las calibraciones.
 - 6.1.3. Las señales dudosas o negativas en el aparato deberán investigarse para comprobar el buen funcionamiento de éste y así obtener los datos correctos.
 - 6.1.4. Preparación de los emplazamientos o reportes de campo. Solicitando los cambios requeridos.

7. ANALISIS ESTADISTICO FORMAL.

- 7.1. El Análisis Estadístico Formal es el que se lleva a cabo matemáticamente, ya sea haciendo uso de una máquina de cálculo o no, para obtener la vida útil fecha próxima de calibración, desgaste máximo promedio y fecha de retiro probable de una unidad de control.
- 7.2. Los resultados del análisis formal deberán entregarse mensualmente a la superintendencia de Inspección Técnica y Seguridad Industrial durante los primeros diez días siguientes al mes de que se trate, haciendo uso de la forma GPEI-1-26.
- 7.3. El procedimiento para el análisis de la estadística se deberá hacer de acuerdo con la siguiente secuencia:

- 7.3.1. Discriminación de valores de espesor no significativos.
- 7.3.2. Cálculo de las velocidades de desgaste por punto (D).
- 7.3.3. Cálculo del promedio de velocidad de desgaste de la línea o unidad de control considerada, efectuando el ajuste estadístico del cálculo $I D I_{m\acute{a}x}$.
- 7.3.4. Determinación del origen de la desviación de los valores de espesores obtenidos respecto al promedio general.
- 7.3.5. Selección del mínimo espesor actual.
- 7.3.6. Obtención de la vida útil estimada (VUE).
- 7.3.7. Obtención de la fecha de próxima calibración (FPC).
- 7.3.8. Obtención de la fecha de retiro probable (FRP).

7.4. Discriminación de valores no significativos.

Se procederá a revisar el registro de calibraciones, comparando los valores de todas las parejas de espesores de un mismo punto correspondientes a dos fechas de calibración consecutivas, eliminando los que no sean significativos para lo cual se observará lo siguiente:

- 7.4.1. Se eliminarán todos los valores de espesor que excedan en 200% o más al espesor original, cuando éste sea conocido y se considere confiable.

7.5. Cálculo de las velocidades de desgaste por punto.

- 7.5.1. Obtener las diferencias de espesores entre posiciones iguales de calibración en cada uno de los puntos de control (norte con norte, sur con sur, 1 con 1, 2 con 2, etc.), utilizando para ello la forma GPEI-1-25.

NOTA: Para que sea aceptable el cálculo de una pareja de fechas de calibración, deberá haber transcurrido cuando menos un año entre ellas. Con fechas más cercanas se obtienen errores inadmisibles.

- 7.5.2. En el análisis, se considerarán todas las parejas de valores de espesor, incluyendo aquéllas, cuyas diferencias sean "cero", ya sea por engordamiento, exceptuando lo mencionado en 7.4.1, o porque no exista desgaste.
- 7.5.3. La velocidad de desgaste por punto se calculará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$D = \frac{e_i - e_f}{ff - fi}$$

Donde:

- D- Velocidad de desgaste del punto.
- ff - Fecha de la calibración más reciente (ef).
- fi - Fecha de la calibración anterior (ei).
- ei - Espesor obtenido en la fecha (fi).
- ef - Espesor obtenido en la fecha (ff).

- 7.5.4. Los valores de desgaste por punto así obtenidos, se anotarán en la columna correspondiente de la forma GPEI-1-25.

7.6. Cálculo del promedio de velocidad de desgaste de la línea o unidad de control considerada.

Para calcular lo anterior, se tomarán las siguientes relaciones:

$$D = \frac{D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n}{n}$$

$$| D |_{\max} = D + 1.28 \frac{D}{\sqrt{n}}$$

Donde:

$D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_n$ - Velocidades de desgaste correspondientes a cada punto de la línea o equipo considerado.

n - Número de valores de velocidades de desgaste que intervienen en el cálculo.

D - Promedio aritmético de las velocidades de desgaste.

$| D |_{\max}$ - Promedio ajustado estadísticamente.

7.6.1. Este promedio de desgaste ajustado se anotará en la columna "velocidad de desgaste" de la forma GPE1-1-26.

7.7. Determinación del origen de la desviación de los valores de espesores obtenidos respecto al promedio general.

7.7.1. Si análisis hechos con anterioridad indican variación en la velocidad de desgaste, se considerará el siguiente criterio.

- A. Cuando el cambio sea en el sentido de aumentar la velocidad de desgaste, se tomará en cuenta el valor obtenido en el último análisis.
- B. Cuando el cambio sea en el sentido de disminuir la velocidad de desgaste, se tomará en cuenta el valor obtenido en el análisis anterior, hasta no tener cuando menos dos análisis consecutivos que confirmen el cambio observado, en cuyo caso se procederá al reajuste. Estos valores se comparan con las velocidades de desgaste puntuales ya asentadas en la forma GPEI-1-25, tomándose nota de aquellas velocidades de desgaste que sobrepasen apreciablemente el valor promedio. Sin embargo, cabe aclarar que las fechas de próxima calibración y fechas de retiro probables, se calcularán con el valor de velocidad de desgaste obtenida en el análisis anterior, hasta no comprobar la veracidad de la velocidad de desgaste última, si ésta es menor a la anterior.

7.7.2. En el caso de tenerse altas velocidades de desgaste y de que las calibraciones efectuadas ya hubiesen sido ratificadas en el campo, se deberá proceder de acuerdo a lo siguiente:

- A. Si la vida útil que se obtenga es menor o igual a 1.5 años, proceder a emplazar la pieza, línea o equipo según el caso y continuar vigilando la unidad de control de acuerdo al resultado del análisis. (Forma GPEI-1-28A).
- B. Si la vida útil obtenida resulta mayor de 1.5 años, deberá procederse en la forma siguiente:
 - B.1. En caso de tratarse de puntos diseminados en diversas partes de la unidad de control, hacer el análisis y de acuerdo con el resultado, programar la siguiente calibración.
 - B.2. En caso de que el desgaste se encuentre localizado en ciertos puntos agrupados entre si, se deberán sacar estos valores del análisis general de la

unidad de control, analizando el resto por separado. Los puntos anormales se deberán vigilar por separado, agrupándolos como una unidad de control independiente. Conviene analizar materiales y cualquier situación anormal en el flujo de la línea como puede ser: un directo, un injerto, un cambio de dirección brusco, etc.

7.8. Determinación del mínimo espesor actual.- Con el fin de contar con los datos necesarios para el cálculo de la vida útil estimada (VUE), fecha de próxima calibración (FPC) y fecha de retiro probable (FRP); se requiere seleccionar el punto que cuente con el espesor mínimo de cada uno de los diferentes diámetros de las secciones que compongan la línea o unidad de control. Dichos espesores se denominarán e_k y la fecha correspondiente, f_k .

7.9. Determinación de la vida útil estimada (VUE), fecha de próxima calibración (FPC) y fecha de retiro probable (FRP).

7.9.1. Esta determinación se hará aplicando las siguientes relaciones:

$$VUE = \frac{e_k - LR}{|D|_{\max}}$$

LR = Límite de retiro.

$$FPC = f_k + \frac{VUE}{3}$$

$$FRP = VUE + \text{Fecha última de calibración.}$$

7.9.2. En caso de que el lapso entre la última calibración y la fecha de próxima calibración (FPC) sea menor de un año, el análisis se hará entre los datos que se obtengan en esta fecha, con los datos de la calibración anterior que corresponda, para que la diferencia de ambas sea de un año o mayor.

7.10. Utilización de resultados asentados en la forma GPEI-1-27.

7.10.1. **Velocidad de desgaste.-** Este resultado servirá para determinar lo siguiente:

- A. Criticidad de circuito (ver 5.31).
- B. Intensidad de calibración (ver 5.3.4).
- C. Programas de pruebas a martillo en reparaciones.
- D. Determinación de vida útil estimada (ver 7.6).

7.10.2. **Vida útil estimada (VUE).-** Este resultado nos da una idea de cuando será necesario solicitar materiales para el cambio de una línea o unidad de control, así como para determinar la necesidad de programar la revisión de reparación de una planta de acuerdo al estado que guarden sus circuitos de proceso. Cuando este valor sea igual o inferior a 1.5 años, emplazar inmediatamente.

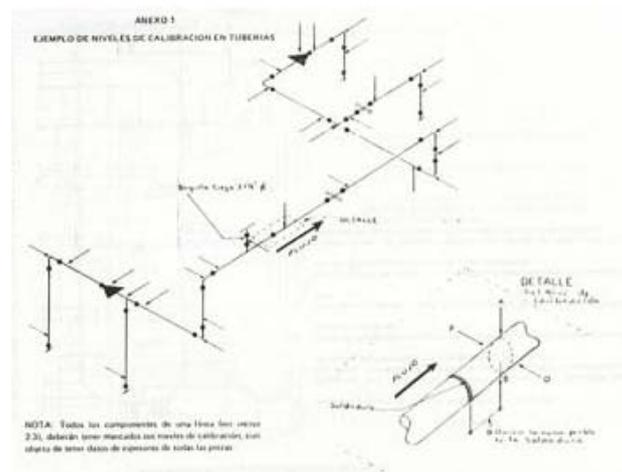
7.10.3. **Fecha de próxima calibración (FPC).-** Esta fecha nos servirá para programar la nueva calibración de la unidad de control en el programa general (ver. 5.1.); en el caso que esta fecha presente un intervalo de tiempo mayor de cinco años, se deberá calibrar a los cinco años como fecha más lejana.

7.10.4. **Fecha de retiro probable (FRP).**- Con base en esta fecha, se deberán efectuar los emplazamientos siempre y cuando para tal fecha falten por transcurrir 1.5 años o menos, no debiéndose emplazar antes.

8. CRITERIOS ADICIONALES.

- 8.1. Cuando las velocidades de desgaste sean mayores en determinados puntos de las líneas, deberá considerarse que pudiera tenerse el caso de corrosión de tipo localizado y por lo tanto, convendrá proceder a programar una revisión de los materiales y de las corrientes de la unidad de control como base para un estudio de corrosión subsecuente.
- 8.2. Cuando el desgaste se encuentre localizado y definido en determinadas zonas de las líneas, convendrá analizar en estas zonas lo siguiente: materiales, tanto de diseño, como de construcción, cualquier situación, un cambio brusco de dirección, cédula menor, etc.
- 8.3. Todas las unidades de control de tuberías consideradas como críticas, deberán ser programadas invariablemente para que sean probadas a martillo cuando la planta salga para reparación general.
- 8.4. Si en una unidad de control existen diferentes clases de materiales en piezas de tubería o partes de equipo, deberán analizarse en forma separada, ya que su comportamiento en cuanto a velocidades de desgaste, es totalmente distinto.
- 8.5. Cuando un emplazamiento o solicitud de fabricación se haya llevado a cabo, para fines de control, se llenará el formato GPEI-1-30A.
- 8.6. En el caso de piezas de tubería, o equipos con materiales fuera de normas o especificación, como podrían ser materiales o cédulas distintas al diseño; en lugar de utilizar la forma de "Emplazamiento", se usará la de "Solicitud de Fabricación" (forma GPEI-1-29A).
- 8.7. Cuando se detecten tuberías o equipos con problemas metalúrgicos, soldaduras defectuosas fracturas, poros, corrosión exterior, o cualquier otro tipo de falla o defecto diferente del concepto de velocidad de desgaste (ver inciso 3.4.) y de ser necesario por seguridad, se utilizará el formato de Emplazamiento (forma GPEI-1-28A).

Anexos.-



ANEXO12.

ALGUNAS ACLARACIONES PARA LA APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CALIBRACION PREVENTIVA (GPEI-IT -0204)

Con el objeto de aclarar algunos conceptos respecto a la aplicación del Procedimiento de Calibración Preventiva en los centros de trabajo de la Subdirección de Transformación Industrial, a continuación se expone lo siguiente:

- 1). Cuando por falla en el suministro de materiales no sea posible efectuar el cambio de un emplazamiento o solicitud de fabricación, se aceptarán a juicio de la entidad de Inspección y Seguridad del centro de trabajo reparaciones provisionales, permaneciendo vigente el emplazamiento o solicitud de fabricación hasta su sustitución definitiva en la primera oportunidad.
- 2). Para el caso de tuberías que operan a bajas temperaturas y en las cuales no es conveniente remover el aislamiento externo, se recomienda efectuar la medición de espesores por el método radiográfico, el cual es confiable hasta diámetro de 8 pulg. Sin embargo, se pueden presentar varias situaciones:
 - a). Tuberías con más de dos años en operación sin datos de valores de espesor se radiografiará el 10% de sus niveles de calibración. Si los valores encontrados no acusan desgaste apreciable en comparación con los valores de diseño, se programará otra determinación a los 5 años.
 - b). Tuberías con más de dos años de operación con una calibración inicial. Se procederá en forma similar al punto a), y con estas 2 determinaciones se hará el análisis para determinar la fecha de próxima calibración.
 - c). Tuberías con diámetros mayores a 8 pulgadas sin ningún dato de calibración. Se deberá hacer una determinación ultrasónica al 100/0 lo antes posible retirando el aislamiento en un paro. Dependiendo de los espesores encontrados y comparando con los datos de diseño y el tiempo de operación, se estimará una fecha de próxima calibración. Desde luego, si los espesores obtenidos acusan desgastes importantes, o si han existido fallas en operación, se ampliará el porcentaje de niveles a calibrar según lo establecido en el procedimiento.
- 3). Equipos operando a bajas temperaturas. Se calibrarán ultrasónicamente en los paros de planta ya sea interiormente o por el exterior retirando el aislamiento. La intensidad de calibración base será del 10% de los puntos, o más si se detectan espesores bajos.
- 4). Aunque en ocasiones se ha seguido la práctica de no quitar la pintura de tuberías y equipo y calibrar encima de la propia pintura, es conveniente se elimine ésta de los lugares donde se va a calibrar dejándolos cubiertos de grasa para evitar la oxidación y para que así no se pierda el punto de control con fines estadísticos.
- 5). Las líneas construidas con materiales especiales resistentes a la corrosión y que de diseño no se consideró en algunos casos el margen correspondiente como por ejemplo:

Titania, inoxidable, aluminio, etc.; se calibrarán a un 25% de sus niveles de calibración en dos fechas espaciadas más de un año, para comprobar que el material se comporte como se planeó, y por lo tanto no hay desgaste, así como para tener datos estadísticos de referencia. Si esto se comprueba, se programará a 5 años la fecha de próxima

4.5.9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Fontana M.G., & Greene N. D. *Corrosion Engineering*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- [2] Sastri V. S. (1998). *Corrosion inhibitors principles and applications*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Oropeza G. M. T., & Ponce de León A.C.A., González M.I. (2000). *Principios y aplicaciones de los procesos electroquímicos*. México D.F.: Impresiones y diseño de la UAM-I.
- [4] Javier Ávila M, & Joan Genescá. (1996). *Más allá de la Herrumbre. México*. Fondo de cultura económica, Colección: L Ciencia desde México, num. 9
- [5] Memorias de XIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (2004). San Luis Potosí, S.L.P, México: Sociedad Mexicana de Electroquímica.
- [6] Proyecto D.328 (2001). *Estudio y desarrollo de inhibidores de corrosión usando simulación molecular y técnicas Electroquímicas*. México D.F. De La Coordinación de Simulación Molecular del IMP.
- [7] Mariaca R. L. Genescá L. J., Uruchutu C. J., Salvador Hdez, L., Veleza L., Maldonado L.,(1999). *Corrosividad Atmosférica*. México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- [8] Argaez V.E. (1972). *Corrosión*. Tula de Allende, Hidalgo, México: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos.
- [9] Casillas N.S. (2001). *Curso –Taller Corrosión y su control*. Guadalajara, Jalisco, México: Universidad de Guadalajara.
- [10] Walsh F. (2000). *Un primer curso de Ingeniería química*. Alicante, España: Imprenta Gamma.
- [11] Ringbom (1963). *Complexation in Analytical Chemistry* Wiley-Interscience. New York.
- [12] Rojas, G. Trejo and M. T. Ramírez (1993). *Diagramas de Zonas de Predominio Aplicados al Análisis Químico*. México D. F. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- [13] Rojas, M. T. Ramírez, J. G. Ibáñez and I. González (1991). *Construction of Multicomponent Pourbaix Diagrams Using Generalized Species*. J. Electrochem. Soc. 138, 366.
- [14] Veloz (2003). *Mecanismo de corrosión de aceros al carbón en una solución Amortiguada de ácido acético, cloruros y H₂S. Modificación por la presencia de inhibidores de corrosión*. México D. F. UAM-I.
- [15] Manual de Procedimientos de la Gerencia de Protección Ecológica e Industrial (1978). México D.F.: Pemex Refinación.

Unidad V.

PROTECCION CONTRA LA CORROSIÓN

5.1 INTRODUCCIÓN.

La quinta unidad, contemplada dentro de la asignatura de Corrosión y Degradación, dará paso a comprender las diferentes formas diferentes formas que existen para evitar o disminuir la corrosión y degradación de un material.

En esta unidad se conocerán cuales son los métodos de protección de un material contra la corrosión y degradación, a través de: revestimientos orgánicos e inorgánicos, las diferentes formas de protecciones metálicas, el uso de inhibidores, protección catódica y protección anódica.

De igual forma que en las unidades anteriores se le pide al alumno el pleno dominio del objetivo planteado en esta unidad.

5.2 OBJETIVO.

1.- Identificar los diferentes métodos de protección contra la corrosión que se utilizan en la vida cotidiana e industria.

5.3 ORIENTACIONES PARA EL ESTUDIO.

Es importante que tomes en cuenta que conocer los diferentes métodos para proteger de la corrosión y degradación a un material es de gran importancia ya que nos permitirá proponer la aplicación de una de ellas para disminuir o evitar la velocidad de corrosión que esta sufriendo un material al estar expuesto a un medio ambiente corrosivo. Por otra parte, el conocer los diferentes métodos de protección contra la corrosión nos permitirá eliminar los daños que económico, humanos y ambientales que coacciona la corrosión y el deterioro de un material.

5.4 ESTRUCTURA TEMÁTICA.

1. Revestimiento orgánico e inorgánico.
2. Protección metálica.
3. Inhibidores de corrosión.
4. Protección catódica.
5. Protección anódica.

5.5 DESARROLLO DE CONTENIDOS

5.5.1 REVESTIMIENTOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS [1][2][4].

RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS.

1.- Recubrimientos de corta duración.

Son aquellos que se utilizan para proteger el material durante su transporte y Almacenamiento (y que casi siempre han de ser eliminados antes de aplicar el medio protector definitivo). Se utiliza para ello: vaselina, grasa mineral, lanolina, aceite de linaza, lacas baratas o lacas sapon.

2.- Pinturas y barnices.

Como medios protectores que deben durar largo tiempo (y de los que a menudo se exigen: gran estabilidad contra los agentes atmosféricos, propiedades mecánicas y efecto estático); por lo cual suelen aplicarse varias manos, por ejemplo: pintura antioxidante sobre preparación de aceite, para construcciones metálicas, cuatro manos: primera y segunda mano de fondo, y tercera y cuarta como cubrición.

3.- De cierto espesor (Aprox. 1 Mm).

De plásticos (resinas de polietileno). Se aplican por pulverización en caliente (a recipientes que haya que proteger contra los ácidos y otros agentes químicos).

Los recubrimientos orgánicos se utilizan comúnmente para mejorar la resistencia a la corrosión. La expresión *recubrimientos orgánicos*, incluye las películas orgánicas, tales como pinturas, resinas, barnices, pez, grasa, placas adhesivas de material plástico, y otros materiales similares. Aunque algunos de los recubrimientos orgánicos, como las pinturas tienen probabilidades de contener materiales inorgánicos, el material predominante es orgánico. La calidad de esos recubrimientos puede mejorarse, o reducirse el costo, mediante el uso de rellenos inorgánicos; sin embargo, básicamente, la protección se proporciona mediante la exclusión de la humedad, el aire y otros medios corrosivos. Puesto que los recubrimientos son orgánicos, se descomponen a temperaturas elevadas. Dichos recubrimientos se recomiendan principalmente para usarse a temperaturas inferiores a las de la ebullición del agua.

FORMULACIÓN.

El ingrediente fundamental en la mayoría de los recubrimientos orgánicos, es un polímero o una mezcla de polímeros.

Las funciones principales de estos son:

- ◆ Protección del material contra la corrosión, la exposición a altas temperaturas y la intemperie.
- ◆ Mejoramiento de la visibilidad por luminiscencia, y de la reflectividad.
- ◆ Aislamiento eléctrico.
- ◆ Mejoramiento de la apariencia.

Los recubrimientos orgánicos siempre contienen un vehículo, y con frecuencia, contienen también pigmentos y secadores. El vehículo contiene una sustancia aglutinante, que forma la película y que mantiene unidas a las partículas del pigmento, cuando se encuentra presente. El vehículo incluye también al adelgazador, que es un solvente volátil

que facilita la aplicación del producto. Los pigmentos alteran la apariencia, así como también las propiedades físicas de la película y, a veces, también las químicas. Los secadores son catalizadores para el endurecimiento de la película, una vez aplicada.

Vehículos.

Las diferencias principales entre las pinturas dependen del tipo de aglutinante que se utiliza en el vehículo. La naturaleza de la sustancia aglutinante determina el mecanismo y, hasta cierto punto, la rapidez del endurecimiento, la resistencia y la durabilidad de la película endurecida.

- ◆ Numerosos aceites vegetales *naturales*, conocidos como *aceites secadores*, son muy útiles como aglutinantes. Estos aceites, los más importantes de los cuales son el de linaza y el de palo, son ácidos grasos no saturados.
- ◆ Cuando quedan expuestas estas sustancias al oxígeno del aire, se forman mediante la adición simple, para formar polímeros con enlaces de oxígeno, o mediante la medición del oxígeno, seguida de una polimerización de tipo de adición.
- ◆ El llamado secado de estos aglutinantes, en realidad, es una polimerización va acompañada por un aumento de la resistencia. La deterioración de la película se produce por medio de una oxidación continua y la fragmentación eventual de las moléculas del polímero.
- ◆ Las resinas constituyen otro tipo importante de aglutinante. Con la excepción de la goma laca, que es de origen animal, todas las resinas útiles son de origen vegetal. Las resinas naturales son sustancias ácidas no saturadas, capaces de aceptar una polimerización, una oxidación, y una reacción con sustancias orgánicas básicas. Esos cambios químicos producen un incremento de la temperatura de fusión o ablandamiento y mejoran la dureza y la resistencia. Además de las resinas naturales, hay otras sintéticas que tienen una gran importancia como aglutinantes y que, a veces, se usan solas o en combinación con las naturales, y aceites secadores para producir materiales de recubrimiento con propiedades muy útiles. Con la excepción de la goma laca y las lacas, el secado de las resinas naturales y sintéticas se realizan mediante la oxidación y/o la polimerización. En la goma laca y lacas, la pérdida del adelgazador da como resultado la formación de una película sólida.
- ◆ Las pinturas de agua, que se distinguen por el uso del agua como medio adelgazador, tiene una gran importancia. Hay dos clases principales de pintura de agua: *las de emulsión de aceite y agua* y *las de emulsión de látex*. La emulsión de aceite y agua consiste en una suspensión estable de aglutinantes de aceite y resina, en una fase continua de agua. Las pinturas de látex o base de goma consisten en una suspensión de partículas sólidas de látex, modificadas ligeramente mediante la adición de resinas que forman la película. Cuando se utiliza pinturas de aceite y agua, esta última se evapora, permitiendo que se unan las partículas de aceite y las de resina, para formar una película. En las pinturas de látex, la película se forma mediante la coagulación de las partículas de caucho o goma, tal y como sucede durante la formación de artículos sumergidos en caucho.

Los Pigmentos.-

- ◆ Desempeñan numerosas funciones importantes, además de su efecto sobre la apariencia y el color. Las partículas de los pigmentos provocan un aumento de la durabilidad y de la resistencia de las partículas que las contienen. Algunos pigmentos, como el cromato de zinc y el plomo rojo, son útiles debido a que mejoran la pasividad

de ciertas superficies metálicas. En superficies porosas, el pigmento controla la absorción del adelgazador, mejorando el rendimiento.

- ◆ La cantidad y las características físicas del pigmento afectan a la viscosidad y la fluidez de la pintura. El ajuste de la relación entre el pigmento y el vehículo y el control de tamaño de las partículas del pigmento, determinan, en gran parte, que la pintura sea brillante o mate.
- ◆ Los pigmentos son de dos tipos diferentes: *blancos y de color*. La capacidad encubridora de los pigmentos blancos aumenta al incrementarse su índice de refracción; por eso, el óxido de titanio tiene la mejor y el plomo blanco la peor capacidad de encubrimiento de todos los pigmentos blancos.
- ◆ La capacidad de encubrimiento de los pigmentos de color dependen de su capacidad para absorber la luz. Hay otras propiedades que, además de la capacidad de encubrimiento, influyen en la selección de los pigmentos. Estos pueden clasificarse también como sustancias orgánicas e inorgánicas. Estas últimas incluyen a materiales tales como el óxido de zinc, el plomo blanco, el óxido de titanio, el negro de carbono, el verde de cromo, y el amarillo de cromo. Las sustancias orgánicas importantes son productos químicos orgánicos, sintéticos y complejos, similares a los tintes.

Los Secadores.-

- ◆ Son productos que se añaden a ciertos materiales orgánicos de recubrimiento, para acelerar el endurecimiento de la película mediante la polimerización y/o la oxidación. Habitualmente son sustancias jabonosas, producidas mediante la sustitución del hidrógeno, de ciertos ácidos orgánicos con metales, tales como Pb, Mn, Co, Fe, Zn y Ca. Básicamente son catalizadores para las reacciones involucradas en el *secado*. No son útiles en los recubrimientos orgánicos que se endurecen mediante una simple evaporación.
- ◆ En los aditivos diversos se incluyen materiales con propiedades antisépticas, para impedir que el producto formulado sufra ataques de materias y mohos. Asimismo, en las pinturas de base de agua, es frecuente encontrar agentes antiespumantes, agentes de dispersión y estabilizadores de las emulsiones.

Tipos principales.-

Las denominaciones comunes para seis tipos principales de recubrimientos orgánicos son:

- ◆ Pintura.
- ◆ Pintura de agua.
- ◆ Barniz.
- ◆ Esmalte.
- ◆ Laca.
- ◆ Goma de laca.

Las diferencias principales entre estos materiales pueden atribuirse a los distintos tipos de vehículos de cada uno de ellos. Otra diferencia esta en que si el material esto o no pigmentado.

Pintura.- es un término que se usa frecuentemente, de manera incorrectamente en lugar de esmalte. Originalmente el término pintura, se aplicaba exclusivamente a los recubrimientos pigmentados, que tenían como aglutinante un aceite secador, como el de

linaza. El uso actual de la pintura es más amplio debido a que el aceite de linaza se ha reemplazado con varios otros materiales. Además del aceite secador el vehículo contiene también un adelgazador que es un solvente orgánico volátil como el aguarrás de acción de secado que es esencialmente una oxidación en el caso del aceite de linaza se acelera mediante la presencia de un secador. Puede usarse un secador jabonoso de manganeso y plomo en una cantidad equivalente al 5% aproximadamente del peso del aceite de linaza.

Barniz.- tiene una formulación similar a las de las pinturas con la excepción de que en este caso se omiten los pigmentos y se añade algún tinte, una resina natural o sintética, el aceite utilizado con frecuencia es el de palo o de Tung que se oxida parcialmente, y se polimerizan a temperaturas elevadas.

Pinturas de agua.- se llaman así porque utilizan agua como adelgazador. Las substancia aglutinante es una combinación de aceite y resina o un látex. El empleo del agua como adelgazador ofrece numerosas ventajas sobre todo para los decorados e interiores de la casa, entre ellas se encuentra el hecho de que es inodora, que se elimina el peligro de los incendios durante la aplicación y que el producto se evapora con nitidez. Algunos tipos de emulsiones están sujetos a los ataques de bacterias y hongos y se descomponen con rapidez, una vez abierto el recipiente que los contiene.

Esmaltes.- son mezclas de pintura y barniz con vehículos similares usados en los barnices, aunque contienen también pigmentos.

Lacas.- son básicamente soluciones nitrocelulosa y absorbentes orgánicos volátiles además de la nitrocelulosa se les añade plastificante y otras resinas para mejorar la calidad de la película.

Goma laca.- es simplemente la solución de una resina natural en alcohol, se endurece por medio de la evaporación del adelgazador y no es muy resistente al agua, su principal uso el como sellador para madera que debe recibir un acabado con otro material de recubrimiento.

Adhesivos.- puesto que la mayoría de los adhesivos existentes son substancias poliméricas es conveniente estudiar en este punto la adhesión y los adhesivos. El requisito fundamental para la adhesión es un contacto íntimo entre átomos y moléculas en una gotita, las moléculas de agua se atraen mutuamente con fuerza, las moléculas de la superficie están sujetas a fuerzas que tiran de ellas hacia dentro y este es el origen de la tensión superficial. La función de un adhesivo consiste en humedecer

RECUBRIMIENTOS INORGÁNICOS.

Incluyen materiales de cerámica, tales como los vidrios. Buenos ejemplos son los utensilios de cocina esmaltados, las tinas del baño y lavabos. Esas cubiertas son eficaces a causa de la exclusión de medios corrosivos. Resisten temperaturas muy por encima de las que provocan que los recubrimientos orgánicos pierdan su eficiencia. Aunque los recubrimientos inorgánicos son duros y resistentes al desgaste, son frágiles y se encuentran sujetos a daños causados por choques térmicos.

1.- Esmaltes inorgánicos.

Son vidriados, constituidos por silicatos, boratos, y aluminatos acompañados de flujos diversos (bórax sobre todo), que se aplica principalmente al acero. El recubrimiento normal no resiste a los álcalis y al ácido fluorhídrico, ni a otros ácidos energéticos. Empleo principal: artículos sanitarios y de economía doméstica. Para los aparatos de la industria química, existen esmaltes especiales.

2.- Fluoruros.

Como enlucido sobre el hormigón, forman una capa de fluoruro, o de fluosilicato, que evita corrosiones del hormigón que hay debajo.

3.- Vidrio soluble.

Es hidrofusilicato sódico o potásico. Aumenta la resistencia del hormigón a los ataques; se emplea como enlucido. Es aplicable, también, sobre recubrimientos de aluminio pulverizado, para elevar la resistencia de la escama protectora.

4.- Revestimiento de cemento.

Para proteger tubos y obras de cemento armado.

5.- Recubrimiento con pastas cerámicas y refractarias.

Para aumentar la estabilidad de la película o escama protectora.

5.5.2 PROTECCION METÁLICA [1][2][9].

Es imposible prevenir el deterioro de las partes metálicas con el tiempo, aunque la degradación superficial causada por fenómenos mecánicos o químicos no pueden evitarse, el tratamiento superficial puede ser la única forma de proporcionar a una pieza las propiedades de resistencia a la corrosión que garantiza un tiempo de razonable de servicio.

La deposición de un metal químicamente inactivo sobre una pieza, puede ser necesario para reducir al mínimo los destrozos del ataque corrosivo, o bien el endurecimiento puede ser la única manera de resolver un problema de desgaste por abrasión.

Protección superficial:

- ◆ Galvanización (electroplastia).
- ◆ Anodizado.
- ◆ Fluidizado de metales.
- ◆ Pulido electromecánico.
- ◆ Revestimiento con metal duro.
- ◆ Carburizado.
- ◆ Endurecimiento por inducción.
- ◆ Cementación en baños de sales.
- ◆ Cianuración y carbonitruración.
- ◆ Endurecimiento a la flama.

Galvanización (Galvanizado).-

Usado para mejorar las propiedades superficiales de desgaste y corrosión mediante la aplicación de un revestimiento metálico, por deposición eléctrica. La función principal de este método de recubrimiento es de mejorar el acabado superficial, reduciendo el coeficiente de fricción y protegiendo al metal de del ambiente corrosivo.

Los factores limitantes que determinan el numero de recubrimientos posibles son: La vida útil (limite de fatiga)del metal base y la resistencia a la corrosión de la superficie del revestimiento

Los metales que se aplican son:

- ◆ El Cd el cual no es afectado por el álcalis rx con el O₂ por que forma una capa de oxido insoluble.
- ◆ El Zn da la formación de ZnCO₃ sobre la superficie que protege al material recubierto de la corrosión. Este metal es muy utilizado por su bajo costo y su facilidad de aplicación por electroplastia.
- ◆ El Cu que sirve como base para otros recubrimientos como el bronce, Ni, Cr ya que la película que forma puede traspasivarse.
- ◆ El Sn que proporciona protección al hierro solo cuando no esta expuesto, se aplica una capa de pintura sobre partes recubiertas de Sn
- ◆ El Cr que es muy duro y da una protección anticorrosiva que es esencialmente mecánica.
- ◆ El Ni que proporciona una su superficie uniforme, lisa y dura, este metal es capas de tomar un alto brillo, es catódico al hierro y resiste corrosión atmosférica.

Anodizado.-

Anodizado consiste en aumentar –por medios electrolíticos (oxidación anodica)- la capa de óxido de aluminio que se forma espontáneamente. De este modo se aumenta la resistencia a los agentes químicos y atmosféricos, al mismo tiempo que aumenta la dureza superficial de la capa. El aluminio formado durante el proceso de anodizado es poroso. Esta porosidad absorberá suciedad y otros elementos lo cual terminarían afectando la estética del material. Para evitarlo se procede a hidratar la capa de oxido de aluminio ("se hincha") de modo de cerrar los poros.

Este revestimiento posee propiedades de aislamiento térmico, puede teñirse o colorear y es aplicable en lugares donde se desean tanto protección anticorrosiva como decorativa.

Fluidizado de metales.-

Se usa una flama de oxi-acetileno o de oxi-gas en la cual se alimenta a un alambre o un metal en polvo, el resultado es un rocío de partículas de metal fundido que puede ser dirigido hacia la superficie de una pieza metálica formando un recubrimiento de partículas. Los metales empleados para este recubrimiento son: Ni, Al, Cd, Cu, Sn, Pb y acero inoxidable. El acabado superficial que se tiene es poroso, lo cual se presta para la aplicación de pinturas. Por otra parte, en este método se puede aplicarse más de 1 metal en una capa para la combinación de propiedades.

Revestimiento con metales duros.-

Primer método: se usa un soplete de oxi-acetileno y una barra de soldadura compuesta del metal que se ha de aplicar.

Segundo método: se usa una soldadura de arco metálico y el metal del revestimiento como electrodo.

Carburizado.-

La cementación o carburización, es uno de los métodos más antiguos para producir un endurecimiento en la superficie de piezas de acero. En este tratamiento, el metal ferroso es expuesto a una atmósfera rica en carbono lo que promueve la adsorción y posterior difusión del carbono en la superficie del metal. Este proceso permite obtener piezas con el corazón blando y la periferia endurecida y se realiza cuando se requiere incrementar el contenido de carbono en la periferia de la pieza, como consecuencia la atmósfera reactiva (N_2 -MeOH) empleada en este proceso, deberá proteger al acero de la oxidación y proveer de carbono suficiente para incrementar su contenido en la superficie.

Este incremento, se basa en la adsorción y posterior difusión del carbono en el acero a altas temperaturas, una vez que la penetración del carbono sea la deseada, se retira la pieza templándola o bien normalizándola.

Endurecimiento por inducción.-

El método de calentamiento por inducción se utiliza de calentamiento por inducción son una fuente de alimentación de CA, una bobina de inducción y la pieza que se va a calentar. La fuente de alimentación transmite corriente alterna por la bobina, con lo que se genera un campo magnético. Cuando se coloca la pieza dentro del campo magnético de la bobina, aparecen corrientes por efecto de la inducción en su interior, generándose calor puro en cantidades precisas y localizadas sin que exista un contacto físico directo. Al alcanzar altas temperaturas que permita el endurecimiento por templado se puede lograr un endurecimiento selectivo o completo pero el contenido de c deberá ser lo mas bajo posible a fin de reducir el agrietamiento

Cianuración y carbonitruración.-

Este método de cianuración se basa en la difusión de carbono y nitrógeno en la superficie de una aleación que se introduce en un baño líquido de cianuros. Mientras que el método de carbonitruración se lleva cabo por difusión de carbono y nitrógeno en la superficie de una aleación en una atmósfera de gas.

Cementación en baño de sales.-

Consiste en la difusión de Ni en la superficie de una pieza mantenida a 1000°F resultando carburos y nitruros. Este método se aplica en aceros inoxidables, aleados, de bajo y medio carbón.

Endurecimiento a la flama.-

Método de endurecimiento superficial de piezas de metal mediante el empleo de una flama de oxi-acetileno seguido de un proceso de templado.

5.5.3 INHIBIDORES DE CORROSIÓN [4].

Generalidades de los inhibidores de corrosión.

El uso de inhibidores de corrosión es uno de los métodos más prácticos para proporcionar protección a los equipos metálicos y su éxito depende muchas veces de la adecuada aplicación de dichos compuestos. Los inhibidores de corrosión son materiales que, cuando están presentes en pequeñas cantidades, producen una disminución en la pérdida de metal debida a ataques de corrosión (M. A. Veloz, 2003).

Los inhibidores de corrosión generalmente son utilizados en la corrosión electroquímica (en presencia de una fase acuosa), que es la más abundante; sin embargo, la tarea de selección de un inhibidor de corrosión en cualquier sistema no es sencilla. El número de diferentes inhibidores disponibles es muy grande y la elección dependerá del metal que se protegerá, de la naturaleza del ambiente corrosivo y de las condiciones de operación a las que se encuentren sometidos.

Los inhibidores de corrosión se usan ampliamente en muchas plantas industriales y la operación de las mismas depende del buen diseño y aplicación de los inhibidores. Estos inhibidores reducirán la velocidad de la reacción de oxidación en el ánodo o de reducción en el cátodo del sistema en corrosión, o bien, en ambas reacciones. Así mismo, pueden formar una barrera protectora contra los agentes corrosivos sobre el metal, ya sea adsorbiéndose sobre la superficie libre del acero, o bien combinándose con los productos de corrosión iniciales. Una descripción comúnmente aceptada es que los inhibidores se adsorben en la superficie del metal mediante una adsorción física (electrostática), la cual es el resultado de las fuerzas atractivas entre los iones orgánicos (generalmente dentro de la formulación del inhibidor) y la superficie del metal eléctricamente cargada. A pesar de ello, la composición química de la mayoría de los inhibidores de corrosión no es del conocimiento público y se mantiene como información protegida por las compañías químicas.

Por otro lado, se sabe que los inhibidores usados en la industria del petróleo se pueden agrupar en varios tipos, de acuerdo a su forma de acción^[3]: a) Pasivantes, b) de fase vapor, c) catódicos, d) anódicos, e) filmicos, f) neutralizantes, y g) reactivos. Aunque los inhibidores más utilizados son:

- ◆ Inhibidores pasivantes.
- ◆ Inhibidores orgánicos.
- ◆ Inhibidores precipitantes.

Los inhibidores pasivantes son materiales oxidantes químicos tales como cromato ($\text{Cr}_2\text{O}_4^{2-}$) y nitrato (NO_3^-) o sustancias tales como Na_3PO_4 . Estos materiales favorecen la absorción del oxígeno disuelto evitando que actúe sobre la superficie del metal; son los más efectivos y consecuentemente los más usados. Los inhibidores cromáticos son los menos costosos para su uso en sistemas acuosos y son ampliamente usados en los sistemas de enfriamiento y recirculación de máquinas de combustión interna, rectificadores y torres de enfriamiento.

Este tipo de inhibidores puede causar picaduras y acelerar la corrosión cuando las concentraciones caen abajo de los límites mínimos. Por esta razón es esencial monitorear constantemente la concentración del inhibidor.

Los inhibidores orgánicos generan una película protectora de moléculas adsorbidas en la superficie del metal, esto provee una barrera a la disolución del metal en el electrolito. Ya que la superficie cubierta del metal es proporcional a la concentración del inhibidor, ésta es un punto crítico en el medio.

Los inhibidores precipitantes son compuestos que causan la formación de precipitados sobre la superficie del metal y con ello proveen una película protectora.

Para aplicación en la industria del petróleo, predominan los inhibidores orgánicos que contienen nitrógeno (aminas)^[3], por su efectividad y disponibilidad. Se cree que estos materiales generan una película de moléculas adsorbidas a la superficie del metal, que proporciona una barrera a la disolución del metal en el electrolito; sin embargo, las concentraciones usadas en campo son tan pequeñas (del orden de 5 ppm), que no parece factible el cubrimiento total de la superficie. Por otra parte, es más posible realizar un recubrimiento parcial de la superficie, modificando las reacciones de oxidación y reducción (una o ambas).

Estos inhibidores generalmente contienen tres elementos: uno o más componentes inhibidores activos; una base solvente; ciertos aditivos, tales como surfactantes, dispersantes, desemulsificantes y antiespumantes.

5.5.4 PROTECCIÓN CATÓDICA [1][4][9].

Una forma muy eficiente de impedir la corrosión es el uso de la protección catódica por medio de ánodos de sacrificio o de corriente impresa. La protección catódica es un complemento perfecto de un buen recubrimiento, ya que la corriente generada por los ánodos protege de inmediato esos puntos en los que el recubrimiento ha sufrido deterioro.

Durante la vida útil de un recubrimiento, éste se va deteriorando progresivamente por lo que a medida que transcurre el tiempo, la demanda de corriente es mayor y los ánodos aumentarán en forma natural su desgaste entregando la corriente necesaria para la protección.

El método de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua y un electrodo auxiliar, la Terminal positiva se conecta al electrodo auxiliar y la terminal negativa se conecta al material que queremos proteger de esta manera la corriente fluye del electrodo a la estructura a través del electrolito.

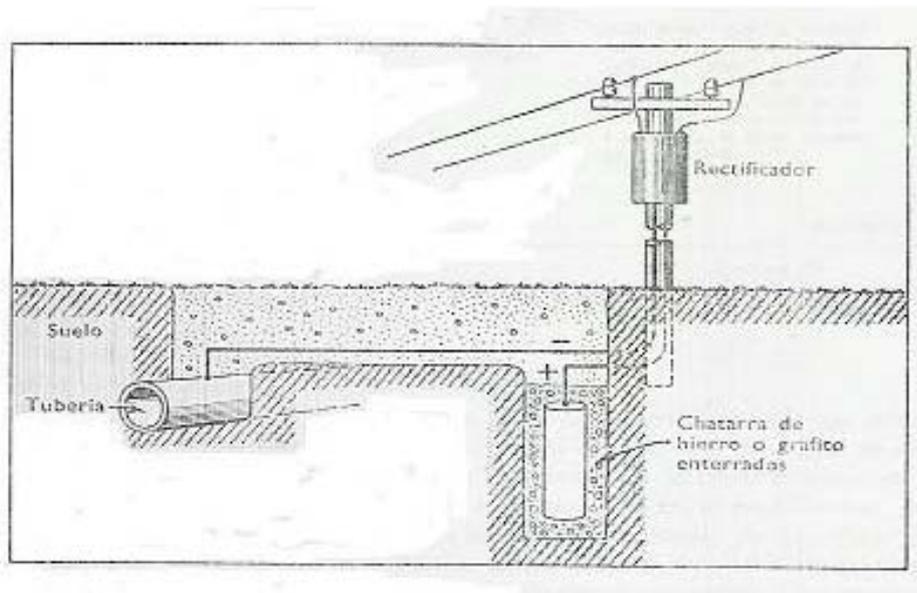


Fig. 45 Esquema de protección Catódica en una tubería.

El método de ánodos de sacrificio, consiste en utilizar un metal mas activo en la serie galvánica que el metal que queremos proteger, y se establece una pila galvánica. Donde la fuente de corriente impresa se elimina, llamando así al electrodo, ánodo de sacrificio.

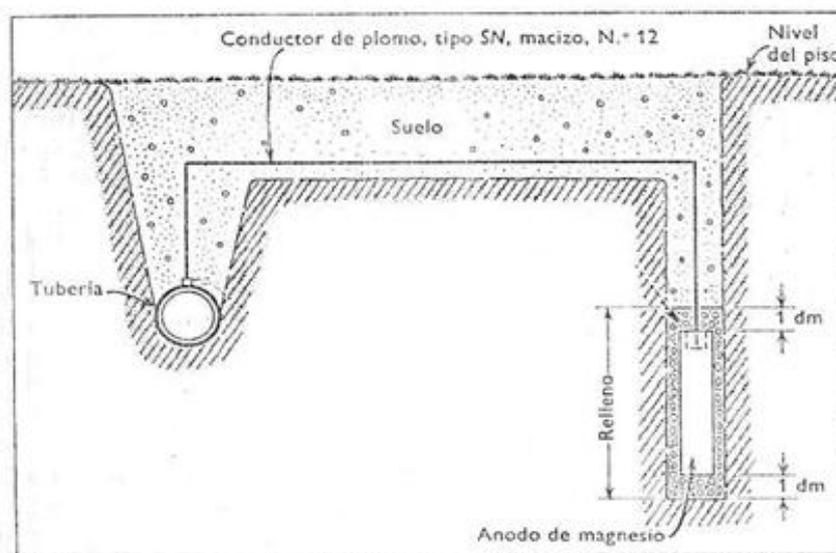


Fig. 46 Esquema de protección de una tubería con ánodo de sacrificio.

La eficacia de la protección catódica se puede verificar de dos maneras:

- ◆ Ensayos con muestra: Un trozo de metal de peso conocido se adapta a la superficie de una tubería enterrada y se conecta por medio de una cable, después se cubre con alquitrán de carbón y se deja la muestra un par de meses para después determinar si la protección catódica esta funcionando correctamente por perdida de peso.

- ◆ Ensayos calorimétricos: Se limpia una zona de la tubería y se coloca un papel empapado con ferrocianuro potásico, se tapa de nuevo la tubería y después de un tiempo relativamente corto se recupera el papel, una coloración azul indica un deficiencia en la protección catódica mientras que la falta de color manifiesta una protección satisfactoria.

La protección catódica es muy empleada por su bajo costo, como en el ejemplo de las tuberías que transportan petróleo y gas natural, el ahorro que se obtiene debido a la reducción de espesores de los tubos es suficiente en algunos casos para costear la instalación de las tuberías y el equipo de protección catódica.

Las compuertas del canal de Panamá están protegidas mediante corriente impresa y el costo de esta protección es menor del 0.5% del costo que supone remplazar las compuertas.

La eficiencia de este tipo de protección contra la corrosión se puede observa en la siguiente figura (Fig. 47).



Fig. 47 Timón de un barco sin PROTECCIÓN



Hélice de un barco con PROTECCIÓN

5.5.4 PROTECCION ANÓDICA [1][4].

Es un método de reducción de la velocidad de corrosión aplicable a aleaciones que presentan una región activa y pasiva amplia en la curva de polarización, así como una velocidad de corrosión baja en la región pasiva a las condiciones de proceso. La aleación es forzada por medio de un potencióstato o fuente de poder externa, a situarse a un potencial en la región pasiva, de tal forma, que la velocidad de corrosión puede ser tan baja como corriente pasiva i_{pass} .

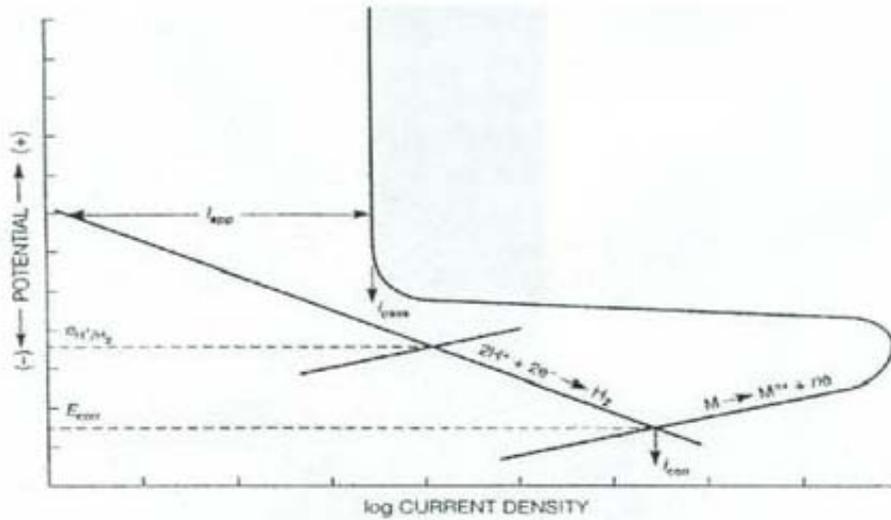


Fig. 48 Control de potencial en la región pasiva para protección anódica (Adaptado de Jones, 1992).

La fuente de poder (potenciostato) para la protección anódica provee el voltaje requerido entre la estructura (ánodo) y el cátodo (electrodo auxiliar). Este voltaje está constituido por el sobrepotencial anódico en la estructura, el sobrepotencial catódico en el cátodo(s) y las pérdidas óhmicas ($i_{app} R$) de la solución entre ellos. En general, la caída óhmica es pequeña y los sobrepotenciales son velocidad de unos pocos cientos de mV.

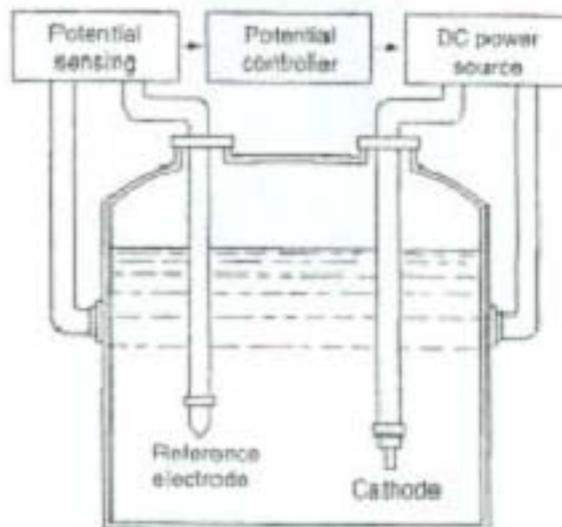


Fig. 49 Equipo esquemático para la protección anódica de un tanque de almacenamiento. (Adaptado de Jones, 1992)

TABLA 15. Protección anódica de aleaciones en diferentes soluciones.

<i>Soluciones</i>	Metales
Ácido sulfúrico	Acero
Ácido fosfórico	Acero inoxidable
Ácido nítrico	Níquel
Soluciones de nitrato	Aleaciones de níquel
Soluciones de amoniaco	Titanio
Ácidos orgánicos	
Soluciones cáusticas	

TABLA 16. Materiales de los cátodos para la protección anódica

Materiales de cátodo	Ambiente
Platino o Latón	varios
Acero	Digestor de líquidos kraft
Acero vaciado aleado con silicio	Ácido sulfúrico (78-100%)
Cobre	Sulfatos de hidroxilamina
Acero Inoxidable	Fertilizantes líquidos (soluciones de nitratos)
Acero recubierto de níquel	Soluciones de plateado de níquel
Hastelloys C	Fertilizantes líquidos (soluciones de nitratos)
	Ácido sulfúrico
	Digestor de líquidos kraft

Las ventajas de la protección anódica es que tiene la habilidad de controlar la corrosión de manera económica en algunos medios agresivos, en donde otros métodos no son adecuados. Las desventajas que se tiene es que el equipo necesario para instrumentar la protección anódica es caro, difícil de instalar y mantener. Una pérdida de control temporal puede ser desastrosa.

5.5.6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Fontana M.G., & Greene N. D. *Corrosion Engineering*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- [2] Sastri V. S. (1998). *Corrosion inhibitors principles and applications*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Oropeza G. M. T., & Ponce de León A.C.A., González M.I. (2000). *Principios y aplicaciones de los procesos electroquímicos*. México D.F.: Impresiones y diseño de la UAM-I.

- [4] Javier Ávila M, & Joan Genescá. (1996). *Más allá de la Herrumbre*. México. Fondo de cultura económica, Colección: L Ciencia desde México, num. 9
- [5] Memorias de XIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (2004). San Luis Potosí, S.L.P, México: Sociedad Mexicana de Electroquímica.
- [6] Proyecto D.328 (2001). *Estudio y desarrollo de inhibidores de corrosión usando simulación molecular y técnicas Electroquímicas*. México D.F. De La Coordinación de Simulación Molecular del IMP.
- [7] Mariaca R. L. Genescá L. J., Uruchutu C. J., Salvador Hdez, L., Veleza L., Maldonado L.,(1999). *Corrosividad Atmosférica*. México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- [8] Argaez V.E. (1972). *Corrosión*. Tula de Allende, Hidalgo, México: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos.
- [9] Casillas N.S. (2001). *Curso –Taller Corrosión y su control*. Guadalajara, Jalisco, México: Universidad de Guadalajara.
- [10] Walsh F. (2000). *Un primer curso de Ingeniería química*. Alicante, España: Imprenta Gamma.
- [11] Ringbom (1963). *Complexation in Analytical Chemistry* Wiley-Interscience. New York.
- [12] Rojas, G. Trejo and M. T. Ramírez (1993). *Diagramas de Zonas de Predominio Aplicados al Análisis Químico*. México D. F. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- [13] Rojas, M. T. Ramírez, J. G. Ibáñez and I. González (1991). *Construction of Multicomponent Pourbaix Diagrams Using Generalized Species*. J. Electrochem. Soc. 138, 366.
- [14] Veloz (2003). *Mecanismo de corrosión de aceros al carbón en una solución Amortiguada de ácido acético, cloruros y H₂S. Modificación por la presencia de inhibidores de corrosión*. México D. F. UAM-I.
- [15] Manual de Procedimientos de la Gerencia de Protección Ecológica e Industrial (1978). México D.F.: Pemex Refinación.
- [16] Ringbom (1963). *Complexation in Analytical Chemistry* Wiley-Interscience. New York.
- [17] S. Caroli and V. K. Sharma (1978). *Tables of Standard Electrode Potentials*. New York, Ed. John Wiley and Sons.

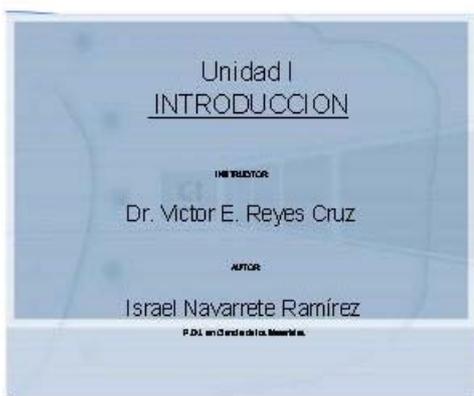
2.4. PRESENTACIONES EN POWER POINT®.

Para la elaboración de las presentaciones se utilizaron los contenidos de las Unidades, la herramienta de Power Point de Microsoft (para darles la forma de diapositivas), y las plantillas en forma de imagen que fueron proporcionadas por el Campus Virtual.

Para su creación solo se necesitó que los contenidos fueran revisados y corregidos de cualquier error, y proseguir con su elaboración de acuerdo a los estándares sugeridos, la colocación de las plantillas en el documento de PowerPoint y el traspaso de las Unidades didácticas a las plantillas creadas.

Las presentaciones elaboradas en Power Point permiten tener un mejor y más ágil manejo de toda la información. Están elaboradas para cada Unidad Didáctica y contienen la información de forma resumida pero sin perder de vista los puntos importantes.

La forma en que se presentan es la requerida por el Campus Virtual.





Ejemplos de Corrosión.

- **Oxido de Acero.**
 - El producto de corrosión (óxido) es sólido pero no protege.
- **Reacción de aluminio con agua.**
 - El producto de corrosión es soluble en agua, por lo que puede ser protector.
- **Combustión del magnesio en aire.**
 - Oxidación a alta temperatura.

Daños por corrosión.

1.- Económicos (pérdidas directas e indirectas).

Daños por corrosión.

2.- Conservación de recursos (agotamiento de las reservas naturales).

Daños por corrosión.

3.- Seguridad humana (fallos fatales en medios de transporte, corrosión de bidones que contienen residuos radiocactivos, escapes en tuberías de refrigeración de pilas nucleares, etc.).

¿Qué es la Ingeniería de Corrosión?

Es la aplicación de la ciencia y arte para prevenir o controlar los daños económicos y de seguridad que ocasiona la corrosión.



Costos de la corrosión.

Estudios de costos totales de la corrosión de 1949 a 1979 de 9 países.

Año	País	Costo en M.D.	% PIB
1941	India	330	
1944	Francia	56 a 77	
1945	Francia	47 a 42	0.16 a 0.77
1949	EPA	4000	3.0
1949	Gran Bretaña	3200	3.5
1973	Australia	550	1.5 a 3.0
1974	URSS	133.0	4.1
1975	EUA	7000	4.2
1977	Japón	9200	1.8



Costos de la corrosión.

El 15%, o sea 10.5 B.D (0.6% del PIB de los EUA) pudiera haberse evitado.

En general el estudio da como resultado que entre el 20 y el 25% del costo total de la corrosión pudiera haberse evitado, mediante una mejor aplicación de las diferentes técnicas anti-corrosión existentes, y con una mayor toma de conciencia de los riesgos que conlleva la corrosión.



El papel del ambiente en el proceso de la corrosión.

Prácticamente todos los ambientes son corrosivos en algún grado

- 1.- El aire, la humedad, el fango, el destilado, la sal y las aguas minerales.
- 2.- Las atmósferas rurales, urbanas e industriales.
- 3.- El vapor y otros gases como el clorhídrico, amoníaco, el sulfuro de hidrógeno, el dióxido de azufre y los gases de combustión.
- 4.- Ácidos minerales como el hipoclorito, sulfúrico, nítrico.
- 5.- Ácidos orgánicos como nafténico, acético y fórmico.
- 6.- Solventes vegetales y aceites de petróleo.



El papel del ambiente en el proceso de la corrosión.

En general los materiales inorgánicos son más corrosivos que los orgánicos.

Por ejemplo la corrosión en la industria petrolera es debido más al cloruro de sodio, sulfuros, hipoclorito y ácido sulfúrico en agua que al aceite o nafteno o la gasolina.

En muchos procesos químicos industriales las altas temperaturas y presiones han hecho posible que estos sean más eficientes y rápidos. Sin embargo, altas de presión y temperaturas involucran condiciones de corrosión más severas, es por ello que se busca el uso de materiales resistentes a la corrosión.



Conocimientos del Ingeniero en corrosión.

- 1.- En el ejercicios y los principios de la corrosión.
- 2.- Química, metalurgia, física y las propiedades mecánicas de los materiales.
- 3.- Pruebas de corrosión.
- 4.- Naturaleza de los ambientes corrosivos.
- 5.- La disponibilidad, fabricación y diseño de materiales.



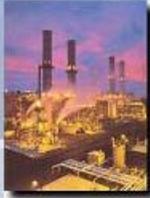
Atributos de los Ingeniero en corrosión.

- 1.- Sentido de relaciones humanas.
- 2.- Integridad.
- 3.- Habilidad para pensar y analizar
- 4.- Conciencia de la importancia de la seguridad.
- 5.- Sentido común.
- 6.- Sentido de organización y de primer importancia.
- 7.- Sólida apreciación por lo económico.

Costos de la corrosión.

En México se han realizado muchos estudios sobre los efectos de la corrosión. A pesar de esto, no se tienen datos precisos de las pérdidas económicas que se generan por este concepto. Sin embargo su impacto es tan amplio que sólo por referir algunos, se relacionan los siguientes:

- Reposición de tuberías y equipos domésticos e industriales.
- Inversiones para su control y prevención.
- Daños a instalaciones marinas y costeras.
- Desgaste de piezas metálicas en automotores.
- Paros de plantas.
- Sobre especificar en el diseño de equipos e instalaciones.
- Pérdida y contaminación de productos.



Costos de la corrosión.

ABRIL ESTIMACIONES DE RECAMBIOS QUIMICOS PARA LA CONCENTRACION DEL NITRICO (INDUSTRIA QUIMICA)

BASE: 1981 (AÑO DE ESTABLECIMIENTO DE LA PLANTA)

LA TABLA DE COSTOS DE LOS RECAMBIOS QUIMICOS EN LA INDUSTRIA QUIMICA DE LA CONCENTRACION DEL NITRICO (INDUSTRIA QUIMICA) SE PRESENTA EN LA TABLA SIGUIENTE:

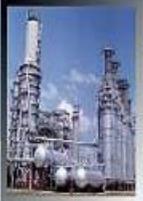
DESCRIPCION	VALOR EN MILLONES DE PESOS		VALOR EN MILLONES DE PESOS (BASE 1981)	CANTIDAD DE RECAMBIOS (BASE 1981)
	1981	1982		
RECAMBIOS QUIMICOS EN LA INDUSTRIA QUIMICA DE LA CONCENTRACION DEL NITRICO (INDUSTRIA QUIMICA)	1,000.00	1,100.00	1,000.00	1,000.00
RECAMBIOS QUIMICOS EN LA INDUSTRIA QUIMICA DE LA CONCENTRACION DEL NITRICO (INDUSTRIA QUIMICA)	1,000.00	1,100.00	1,000.00	1,000.00
TOTAL RECAMBIOS QUIMICOS EN LA INDUSTRIA QUIMICA DE LA CONCENTRACION DEL NITRICO (INDUSTRIA QUIMICA)	2,000.00	2,200.00	2,000.00	2,000.00

Costos de la corrosión.

En la industria petrolera, la corrosión resulta ser un factor significativo en el incremento de costos de operación de las plantas de refinación de petróleo crudo en:

- Plantas primarias.
- Plantas de cracker (pirólisis) de vapor.
- Plantas de hidrocraqueo (hidrodesulfuración, hidrotretamiento).
- Plantas de oxidación catalítica (FCC, TCC).
- Plantas de reformado y aromatización.
- Plantas de hidrogenación de naftaleno.
- Seve corrientes de efluente y agua de enfriamiento.

El control de la corrosión es de vital importancia y aunque es un gasto fijo, el ahorro que genera produce más los productos que produce, permitiendo que los costos de producción sean más bajos, aumentando el rendimiento y la eficiencia de producción (aprox. 30 millones) anuales a otros factores ambientales y sociales.



Costos de la corrosión.

Corrosión.

Es el ataque destructivo de un material por una reacción química o electroquímica con el ambiente.

La importancia de su estudio se basa en tres aspectos:

1. Económico
2. Seguridad
3. Conservación.

El factor económico de la corrosión y prevención para la explotación de un sistema de transporte de líquidos (líquidos corrosivos) es el costo de operación del sistema (incluyendo los costos de mantenimiento).

- Pérdida de plantas
- Pérdida de producción
- Pérdida de eficiencia
- Contaminación del medio ambiente
- Seguridad
- Reparación de equipos y accesorios
- Control y prevención

Se estima que en EEUU únicamente esto representa el 4% de su producto interno bruto, en otros países (Japón, que también, una gran potencia) el porcentaje es de 2-4% del PIB.



Unidad II
FUNDAMENTOS
ELECTROQUIMICOS

INSTRUCTOR
Dr. Victor E. Reyes Cruz

AUTOR
Israel Navarrete Ramírez

© 2011, en Consejo de las Américas

REACCIONES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE LA CORROSION

Las reacciones que ocurren en una celda electroquímica son heterogéneas, esto es a que ocurren vía transferencia de carga a través de la interfase entre un electrodo y un electrolito.

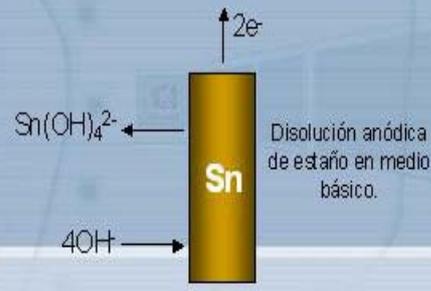
REACCIONES INVOLUCRADAS EN EL PROCESO DE LA CORROSION

$A + B \rightarrow C + D$

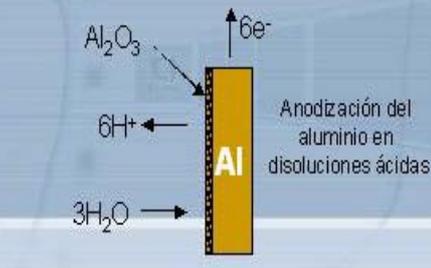
$A + e \rightarrow C$ } Reacción de Reducción

$B \rightarrow D + e$ } Reacción de Oxidación

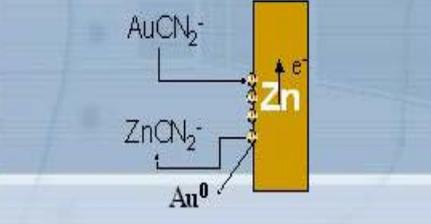
Los procesos de corrosión pueden ser:
1) Disolución del metal

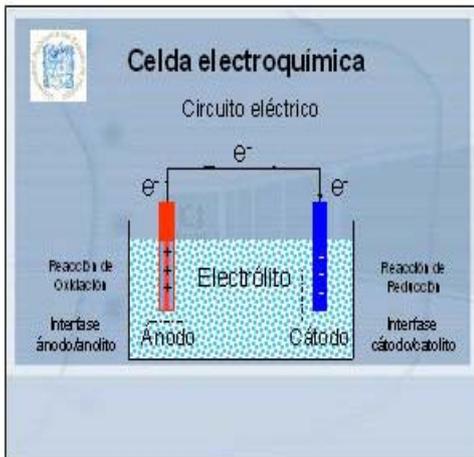


Los procesos de corrosión pueden ser:
2) Transformaciones de fases en la superficie.



Los procesos de corrosión pueden ser:
3) La cementación.

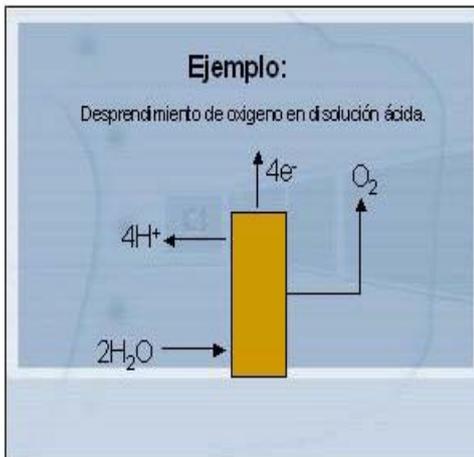




¿Cuál es la importancia de la celda electroquímica?

El proceso de la corrosión es una reacción de oxidación, pero:

"No toda oxidación es un proceso de corrosión".



Termodinámica

Relación entre G (energía libre de Gibbs) y E

A temperatura y presión constante

$$\Delta U = q - W \text{ ----- (1)}$$

Donde:

$$W = W_m + W_e \text{ ----- (2)}$$

Considerando un sistema completamente reversible, el trabajo mecánico a temperatura y presión constante es:

$$W_m = -P\Delta V \text{ ----- (3)}$$

A demás de las ecuaciones de la termodinámica tenemos:

$$q = T\Delta S \text{ ----- (4)}$$

Relación entre G (energía libre de Gibbs) y E

La energía libre de Gibbs, a temperatura y presión constante

Donde:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \text{ ----- (5)}$$

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \text{ ----- (6)}$$

Combinando las ecuaciones (1) a (6) se tiene:

$$\Delta G = -nF E \text{ ----- (7)}$$

$$W_e = nF E \text{ ----- (8)}$$

$$\Delta G = -nF E \text{ ----- (9)}$$

Relación entre G (energía libre de Gibbs) y E

Criterio de espontaneidad para procesos a presión constante e isotérmicos ΔG .

$\Delta G < 0$	$E > 0$	Espontánea.
$\Delta G > 0$	$E < 0$	No espontánea.
$\Delta G = 0$	$E = 0$	Equilibrio

Procesos de Celda
 En una celda ocurren tres procesos.
 $E_{c\text{el}} = E_c - E_a$

Proceso Catódico.
 Ecuación de Nerst

$$E_c = E_c^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{O_2} a_{H^+}^2}{a_{H_2O}}$$

$$E_c = E_{O_2/H_2O}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{O_2} a_{H^+}^2}{a_{H_2O}}$$

Ecuación de Nerst

$$E_a = E_a^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{O_2} a_{H^+}^2}{a_{H_2O}}$$

$$E_a = E_{O_2/H_2O}^0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{O_2} a_{H^+}^2}{a_{H_2O}}$$

$$E_a = -E_c$$

¿Cómo se mide E para cada proceso?

Tipos de celdas.
 • Electrolítica

$\Delta G_0 = +$ } Proceso "NO"
 $E_{ca} = -$ } espontáneo

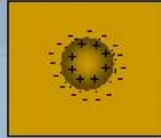
Tipos de celdas.
 • Galvánica

$\Delta G_0 = -$ } Proceso
 $E_{ca} = +$ } espontáneo



Causas para que exista un electrodo mixto.

c) Por reacciones electroquímicas.



Causas para que exista un electrodo mixto.

d) Por especies adsorbidas.



Polarización.

El flujo de e^- propicia que los E en equilibrio de cada fase se desvie de su valor inicial, en otras palabras, es el desplazamiento de un potencial de equilibrio hacia otro por medio de una corriente eléctrica.

Equilibrio del Cu.

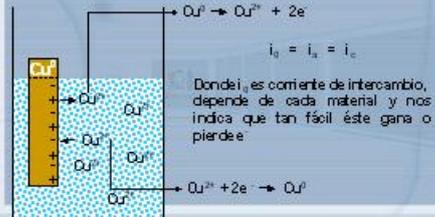
Condiciones del sistema

- $E_c \text{ Cu}^{2+} > E_c \text{ H}^+$
- No hay oxígeno.



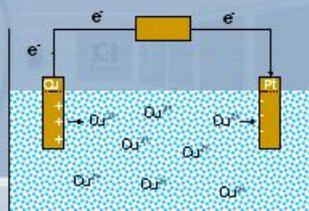
Polarización.

Equilibrio del Cu.



Polarización.

Fuera del equilibrio.



Polarización.

Fuera del equilibrio.

$$i_0 \neq i_a \neq i_c$$

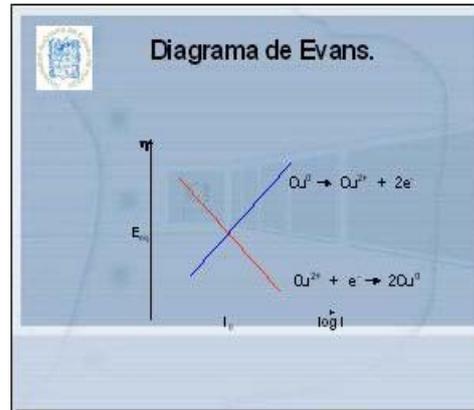
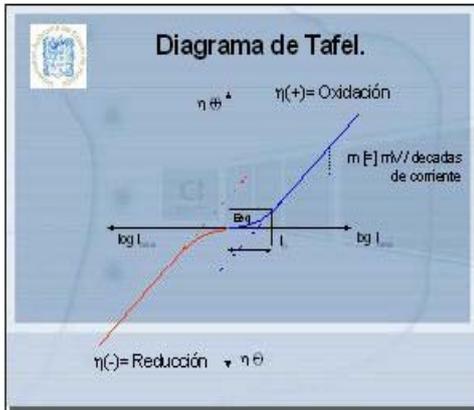
$$i_{\text{neta}} = i_c - i_a$$

$$\eta = a + b \log(i_{\text{neta}})$$

$$\eta = E_{\text{aplicado}} - E_{\text{eq}}$$

Ley de Tafel

Solo es valida cuando la etapa más lenta en la cinética es transferencia de carga (e^-) en la interfase.

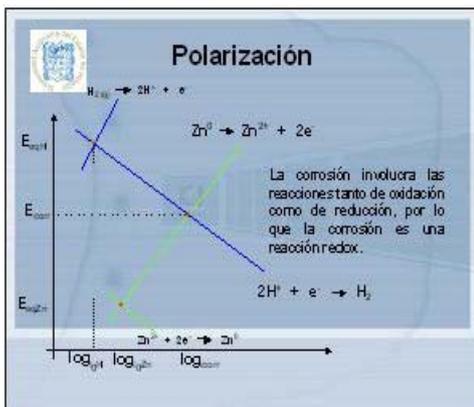
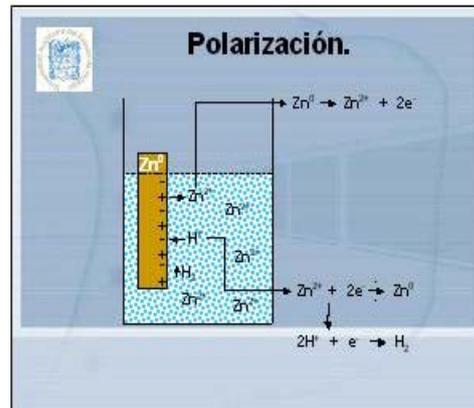


Polarización.

Fuera del Equilibrio del Zn.

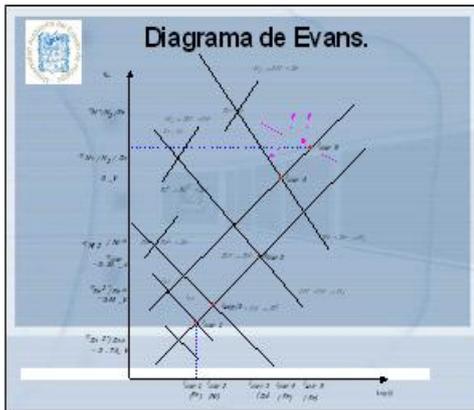
Condiciones del sistema:

- $E_{\text{c Zn}^{2+}} < E_{\text{H}^+}$.
- Oxidación es espontánea.



¿Como se incrementa la i_{corr} ?

1. La red H^+ en $\text{Fe} > \text{Zn}$.
 $i_{\text{corr1}} > i_{\text{corr3}}$
2. Entre mayor sea el par galvánico, mayor es la corrosión.
 $i_{\text{corr2}} > i_{\text{corr1}}$
3. Disminución de la pendiente catódica.
 i_{corr5}



Polarización por Activación y Concentración.

- La polarización por activación sigue la ley de Tafel.
- La polarización por concentración se da por la caída de un reactivo en la superficie. La polarización por concentración depende del transporte de masa.

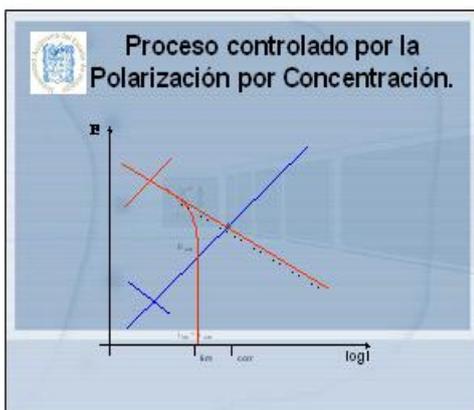
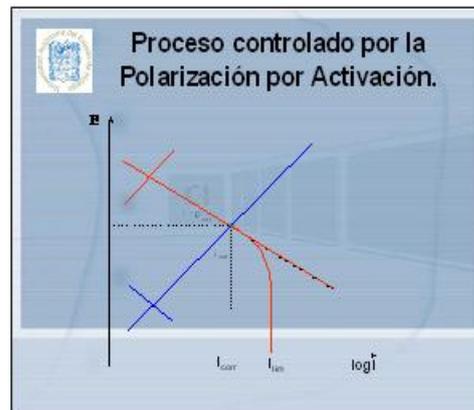
Polarización por Activación y Concentración.

Cinética.

$$\eta_{total} = \eta_{act} + \eta_{conc}$$

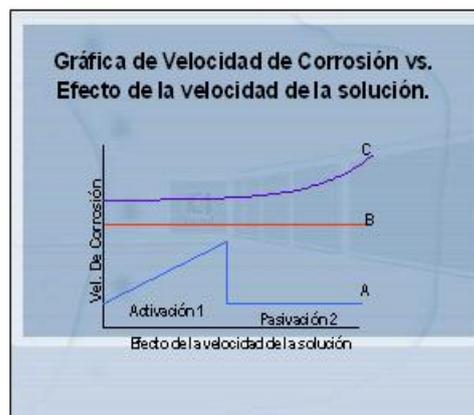
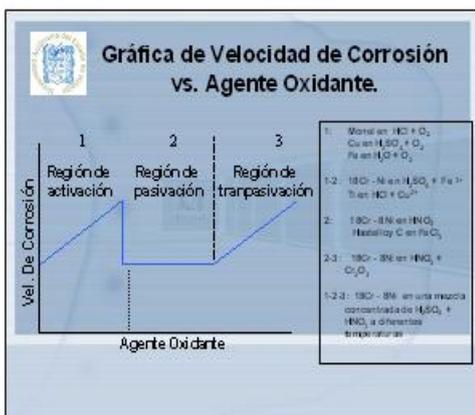
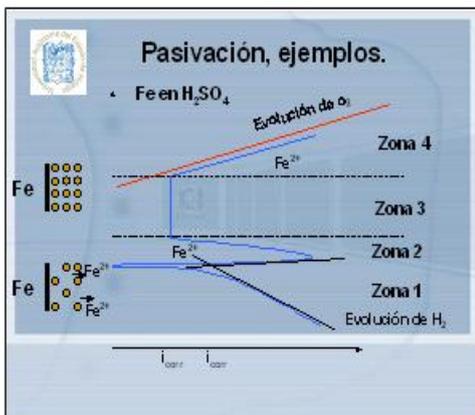
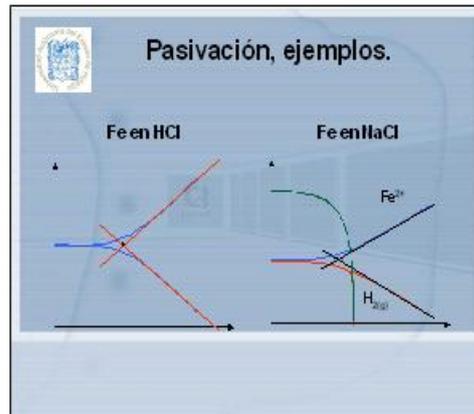
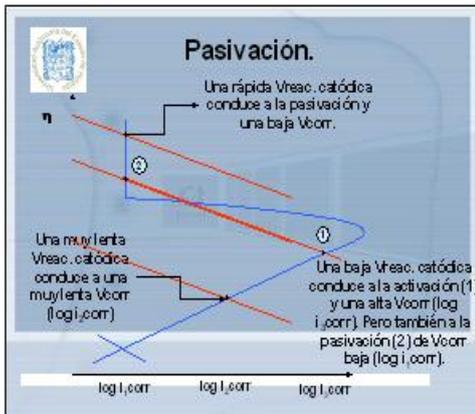
Tran. cinética de carga
Tran. cinética de masa

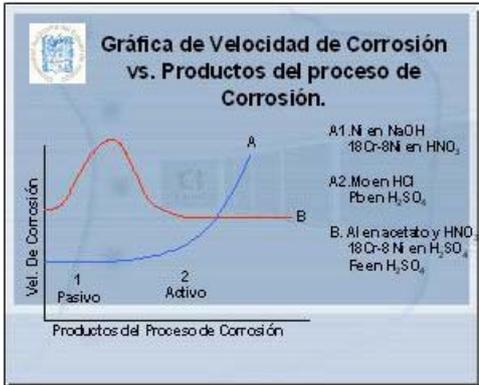
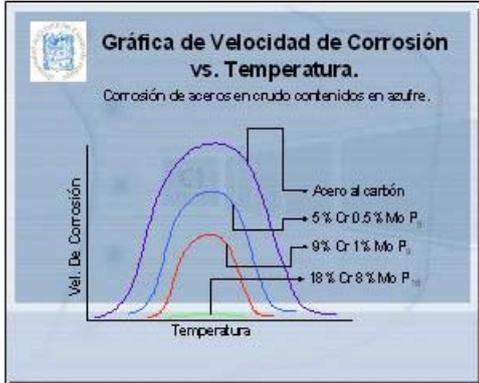
Los procesos de corrosión están controlados por la polarización por activación o por la polarización por concentración.



Pasivación.

La **Pasivación** es la formación de una película de óxidos o hidróxidos en la superficie que no reacciona con el medio.





Unidad III FORMAS DE CORROSION

IMAGEN

Dr. Victor E. Reyes Cruz

AUTOR

Israel Navarrete Ramírez

Facultad de Química de la UNAM

Clasificación de la corrosión.

La Corrosión ocurre en muchas y variadas formas pero su clasificación generalmente se basa en uno de los tres siguientes factores:

1.- Naturaleza de la sustancia corrosiva.

La corrosión puede ser clasificada como:

- Húmeda: requiere de un líquido o humedad.
- Seca: se desarrolla generalmente con gases a altas temperaturas.

Clasificación de la corrosión.

2.- Mecanismo de corrosión.

Comprende las reacciones electroquímicas o bien las reacciones químicas.

- Oxidación.
- Corrosión electroquímica.

3.- Apariencia del metal corroído.

- Uniforme.
- Localizada.

Clasificación de la corrosión.

Corrosión.	Uniforme.	}	•Galvánica.
	Macroscópica.		•Erosión.
			•Socavados.
Localizada.	Microscópica.	•Picadura.	
		•Exfoliación.	
			•Ataque selectivo.
			•Intergranular.
			•Fractura por corrosión bajo tensión.
			•Fragilización de hidrógeno
			•Microbiológica

¿Que es la Corrosión Uniforme?

Es el ataque uniforme sobre grandes áreas de una superficie metálica, es la forma más común de la corrosión y puede ser húmeda o seca, electroquímica o química.

¿Como controlarla?

Es necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura.

Por otra parte, la corrosión uniforme es la forma más fácil de medir por lo que las fallas inesperadas pueden ser evitadas simplemente por inspección regular.



Fig. 1 Corrosión uniforme

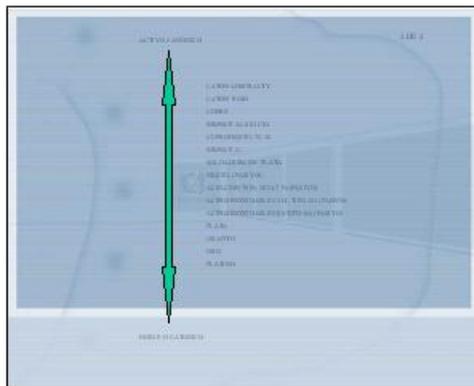
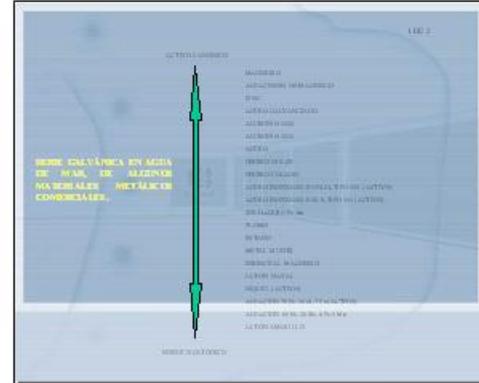
¿Que es la Corrosión Galvánica?

La corrosión galvánica ocurre cuando dos metales diferentes en contacto (o conectados por un conductor eléctrico) se exponen a una solución conductora.

El potencial eléctrico que existe entre metales diferentes actúa como fuerza directriz para pasar corriente a través del agente corrosivo, lo que da por resultado la corrosión de uno de los metales del par.

Ejemplos de Corrosión Galvánica.

Es común usar láminas de hierro galvanizado (recubiertas de cinc) para resistir la corrosión atmosférica, en este caso el cinc se corroe preferentemente. Si incluso tiene un agujero, el acero que queda expuesto no se corroe si existe buen contacto eléctrico del hierro al cinc, pasando por el agente de corrosión. La relación entre las áreas superficiales del metal activo y el metal noble es muy importante porque la velocidad de corrosión depende de la densidad de corriente. Naturalmente, ésta es mayor si el área del metal activo es pequeña comparada con la del metal noble.



¿Que es mejor?

Un perno de acero en una estructura de latón, o un perno de latón en una estructura de acero.

El acero se rinde el acero, por lo que un pequeño perno de acero en una larga estructura de latón sufrirá una severa corrosión Galvánica. Un perno de latón se rinde protegido por la estructura de acero.

<p>Perno de latón en una estructura de acero</p> <p>El pequeño perno de latón causaría incrementos pequeños en la corrosión de la estructura de acero. El perno estaría protegido de la corrosión por la pared formada con el acero.</p>	<p>Perno de acero en una estructura de latón</p> <p>El ánodo pequeño de acero sufrirá un incremento grande en la corrosión debido a la pared formada con la estructura de latón.</p>
---	---

Las condiciones para que la corrosión galvánica se presente son:

- 1.- Cuando se conectan metales diferentes, el más activo o metal anódico se corroe más rápidamente mientras que el metal más noble o metal catódico tiende a protegerse.
- 2.- A medida que la diferencia de potencial entre los dos metales se incrementa, la corrosión galvánica también aumenta. Un ejemplo de la corrosión galvánica se presenta al conectar tuberías de aluminio y de hierro que dan como resultado una mayor velocidad de corrosión en la tubería de aluminio.

La corrosión galvánica se presenta también con mucha frecuencia en cambiadores de calor donde los tubos generalmente son de cobre, mientras que el resto del cambiador de calor es de acero. En estas condiciones, la parte de acero funciona anódicamente disolviéndose mientras que los tubos de cobre funcionan catódicamente protegiéndose.

En el problema planteado del cambiador de calor se puede ver el efecto que las áreas de los diferentes metales tienen en el fenómeno corrosivo, y puede establecerse que a medida que la relación de área catódica a área anódica se aumenta, la velocidad de corrosión se acelera.

Condiciones para que ocurra este tipo de corrosión:

- 1.- Presencia de dos metales electroquímicamente diferentes.
- 2.- Contacto eléctrico entre los dos metales diferentes.
- 3.- Los metales deberán estar expuestos a un electrolito.



Fig. 2. Corrosión galvánica.

La corrosión galvánica en un tornillo de acero en un ambiente húmedo.

Formas para evitar la corrosión galvánica

La forma de prevenir este tipo de corrosión se puede hacer con los siguientes métodos:

- 1.- Evitando el uso de metales diferentes siempre que esto sea posible. Si esto no es práctico, tratar de usar metales que estén lo más cercanos posible entre sí en la serie galvánica.
- 2.- Es necesario evitar una relación de áreas desfavorables, es decir, bajo ninguna circunstancia conectar una pequeña área anódica a una gran área catódica.

3.- Si se utilizan metales diferentes, aislar eléctricamente uno del otro, instalando juntas de aislamiento.

4.- Si se necesita utilizar metales diferentes, y no pueden ser aislados, las partes anódicas deberán ser diseñadas de manera de poderlas reemplazar fácilmente o construir las de materiales más gruesos para alargar la vida del equipo bajo los efectos de la corrosión.

5.- Conservar los recubrimientos.

Con los metales nobles (cátodo) es muy importante conservar el recubrimiento en la mayor área posible.

Con el ánodo es esencial recubrir completamente para evitar ataques por "área desfavorable" en los huecos que deje el recubrimiento.

6.- Póngase un tercer metal en contacto con los dos metales en cuestión. Este tercer metal se escoge de modo que sea más activo que los otros como yéndose en lugar de la estructura.

Es fácil exagerar el problema de corrosión galvánica. Muchos pares de metales, aunque estén separados en la serie galvánica, pueden no fallar por corrosión galvánica. Igualmente materiales relativamente cerca en la serie raramente darán problemas.

Por ejemplo, los aceros inoxidables y las aleaciones de cobre se usan frecuentemente en aplicaciones marinas, sin problemas.

¿Que es la Corrosión por Erosión?

Quando un medio corrosivo actuando sobre una superficie metálica aumenta su velocidad el ataque debido a desgaste mecánico y la corrosión aumenta.

El resultado se conoce con el nombre de corrosión erosión. La importancia relativa del desgaste mecánico y corrosión es con frecuencia difícil de evaluar y varía mucho de una situación a otra.

El papel de la erosión se atribuye usualmente a la remoción de las películas superficiales protectoras, por ejemplo, las películas de óxido formadas por el aire o los productos de corrosión adherentes.

¿Como se presenta?

La corrosión erosión generalmente aparece en forma de agujeros poco profundos con el fondo alisado. El ataque puede seguir la forma de la dirección de la ruta que el agente de corrosión sigue al moverse sobre la superficie del metal.

La corrosión-erosión prospera en condiciones de alta velocidad, como turbulencias, incidencias, etc. Así que se observa con frecuencia en impulsores de bombas, agitadores y tuberías particularmente en cunyas y codos.

Esto tipo de corrosión se evita con cambios de diseño o con selección de un material más resistente.



¿Como evitar la Corrosión por Erosión?

Este material, usualmente aunque no siempre, será más resistente en condiciones de estancamiento y será también más duro.

En sistemas de tubería, la corrosión-erosión también puede reducirse incrementando el diámetro de la tubería lo cual disminuye la velocidad y la turbulencia.

El atenuamiento del flujo en curvas y el uso de baffles, son dos cosas útiles para minimizar los efectos de impacto.

Las tuberías interiores no deben dirigirse sobre las paredes del recipiente, siempre que sea posible. Los ensanchamientos en los tubos a la entrada de un haz, pueden reducir problemas de este tipo. Además, es judicioso diseñar el área que puede ser susceptible de erosión-corrosión de modo que pueda reemplazarse fácilmente.

Abrasión.

La corrosión por cavitación y desgaste son formas especiales de la corrosión por erosión. La primera es causada por la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie del metal. Las altas presiones producidas por este colapso pueden disolver el metal, remover las películas protectoras, etc.

La corrosión por desgaste ocurre cuando las piezas de metal se deslizan una sobre la otra, causando daño mecánico a una o ambas piezas y el deslaminamiento es generalmente un resultado de la vibración.

Esta corrosión se cree que juega uno de los siguientes papeles: el calor de la fricción oxida el metal y el óxido se desgasta o bien la remoción mecánica de las películas protectoras de óxido, o los productos de la corrosión resultantes, dan como resultado la exposición de superficies limpias del metal al medio agresivo, en tal forma, que el fenómeno corrosivo se acelera.

La corrosión por deslaminamiento se atenúa utilizando materiales de construcción más duros, empleando lubricación o bien incrementando la fricción hasta un punto tal en que el deslaminamiento es imposible.

Corrosión por Socavados

Los socavados se forman en juntas, empaques, remaches, ribetes, etc. También, son originados por depósitos de mugre, productos de la corrosión, rasguños sobre la pintura, etc.

La corrosión por socavados se atribuye generalmente a una o algunas de las siguientes causas: cambios de acidez en el socavado, ausencia de oxígeno en el socavado, crecimiento de iones perjudiciales, o disminución de un inhibidor.

Como todas las formas de ataques localizados, la corrosión por socavados no se presenta en todas las combinaciones metal-medio corrosivo.

Fig. 4. Los agrietamientos producidos en juntas de los remaches y abocados de las tuberías de la planta.



¿Cómo evitar la Corrosión por Socavados?

Algunos materiales son más susceptibles a este tipo de corrosión que otros. Aquellos que dependen de una película por formación de oxígeno para su protección contra la corrosión como los aceros inoxidable y el titanio.

Estos materiales pueden suplirse con aleaciones para mejorar su resistencia.

Esta solución, conjuntamente con un diseño para minimizar los socavados y los trabajos de mantener limpias las superficies, serán lo indicado para combatir el problema.

Corrosión por Picaduras

La corrosión por picaduras (pitting) es la formación de hoyos en una superficie relativamente no atacada. Estos agujeros pueden tener varias formas. La forma de la picadura con frecuencia tiene que ver con el crecimiento de la misma, por las mismas razones anotadas en la corrosión por socavados. Una picadura, puede en efecto, considerarse como un socavado que se forma por sí mismo.

La corrosión por picadura es un proceso lento que puede llevarse meses y años antes de ser visible pero que naturalmente causará fallas inesperadas. El pequeño tamaño de la picadura y las minúsculas cantidades de metal que se disuelven al formarla, hacen que la detección de ésta sea muy difícil en las etapas iniciales.



Fig. 5. Una forma de corrosión por picadura en una superficie pulida y brillante de una tubería.

¿Cómo evitar la Corrosión por Picadura?

Para reducir la corrosión por picadura se necesita una superficie limpia y homogénea, por ejemplo, un metal homogéneo y puro con una superficie muy pulida deberá ser generalmente, mucho más resistente que una superficie que tenga incrustaciones, defectos o rugosidad.

La limpieza de la superficie y la selección de materiales conocidos, resistentes a la formación de picaduras en un medio ambiente determinado, es generalmente el camino más seguro para evitar este tipo de corrosión.

Exfoliación y Lixiviación Selectiva.

La Exfoliación es una corrosión bajo la superficie que se inicia en una superficie limpia pero se propaga hacia abajo de ella. Se diferencia de las picaduras en que el ataque tienen una apariencia laminar y se van comiendo capas completas de material. El ataque se nota porque la superficie se marca por escamas o ampollas.

El extremo de una muestra parece un paquete de naipes mal acomodado. Este fenómeno es bien conocido en las aleaciones de aluminio y se corrige con tratamientos térmicos y aleaciones seleccionadas.

La Lixiviación Selectiva (llamada también separación) es la remoción de un elemento de una aleación. El ejemplo más común es la lixiviación del zinc de una aleación cobre-zinc.

Esta corrosión es perjudicial principalmente porque da un metal poroso con propiedades mecánicas pobres.

¿Cómo evitar la Corrosión por Exfoliación?

El remedio consiste en usar aleaciones no susceptibles a este fenómeno.

Corrosión Intergranular o Intercristalina.

Para entender este tipo de ataque es necesario considerar que cuando un metal fundido se nuclea en un molde, su solidificación comenzó con la formación de núcleos al azar, cada uno de los cuales crece en un arreglo atómico regular para formar lo que se conoce con el nombre de granos o cristales.

El arreglo atómico y los espaciamientos entre las capas de los granos, son los mismos en todos los cristales de un metal dado, sin embargo, debido a la nucleación al azar, los planos de los átomos en las cercanías de los granos no encajan perfectamente bien y el espacio entre ellos recibe el nombre de límite de grano. Si se dibuja una línea de 2.5 cm. de longitud sobre la superficie de una aleación, está deberá cruzar aproximadamente 1,000 límites de grano.

Los límites de grano son a veces atacados preferencialmente por un agente corrosivo y el ataque se relaciona con la segregación de elementos específicos o por la formación de un compuesto en el límite. Esta corrosión generalmente ocurre porque el agente corrosivo ataca preferencialmente el límite de grano o una zona adyacente a él, que ha perdido un elemento necesario para tener una resistencia a la corrosión adecuada.

En un caso severo de corrosión intergranular, granos enteros se desprenden debido a la deterioración completa de sus límites, en cuyo caso, la superficie aparecerá rugosa al ojo desnudo y se sentirá rasposa debido a la pérdida de granos.

La rugosidad de la superficie causada por la corrosión intergranular es aproximadamente como se muestra en la figura.



Fig. 8 Corrosión de grano. (De la literatura de la NASA)

¿Cómo evitar la Corrosión Intergranular o Intercristalina?

El fenómeno de límite de grano que causa la corrosión intergranular es sensible al calor por lo que la corrosión de este tipo, es un subproducto de un tratamiento térmico como la soldadura o el relevado de esfuerzos y puede ser corregido por otro tipo de tratamiento térmico o por el uso de una aleación modificada.

Corrosión de Fractura por Tensión.

La acción conjunta de un esfuerzo de tensión y un medio ambiente corrosivo dará como resultado en algunos casos, la fractura de una aleación metálica. La mayoría de las aleaciones son susceptibles a este ataque pero afortunadamente el número de combinaciones aleación-corrosivo que causan este problema, son relativamente pocos. Sin embargo, hasta la fecha, este es uno de los problemas metalúrgicos más serios.

Los esfuerzos que causan las fracturas provienen de trabajos en frío, soldadura, tratamientos térmicos o bien pueden ser aplicados en forma externa durante la operación del equipo.

Las fracturas pueden seguir caminos intergranulares o transgranulares que a menudo presentan una tendencia a la ramificación.

Alguna de las características de la corrosión de fractura portensión son las siguientes:

- a) Para que esta corrosión exista se requiere un esfuerzo de tensión.
- b) Las fracturas se presentan quebradizas en forma microscópica, mientras que las fallas mecánicas de la misma aleación, en ausencia de un agente corrosivo específico, generalmente presentan ductilidad.
- c) La corrosión por esfuerzos depende de las condiciones metalúrgicas de la aleación.
- d) Algunos medios ambientes específicos generalmente causan fractura en una aleación dada. El mismo medio ambiente no causa fracturas en otras aleaciones.



Fig. 7 Una forma de falla causada por corrosión por tensión en titanio en agua.

¿Como evitar este tipo de Corrosión.?

Para combatir la corrosión de fracturas por tensión, es necesario realizar el relevado de esfuerzo o seleccionar un material más resistente

La Corrosión por Fatiga

Es una forma especial del tipo de corrosión de fractura portensión y se presenta en ausencia de medios corrosivos, debido a esfuerzos cíclicos repetidos. Estas fallas son muy comunes en estructuras sometidas a vibración continua.

La corrosión por fatiga se incrementa naturalmente con la presencia de un medio agresivo tal como el esfuerzo

Un metal que falla por corrosión por fatiga por lo general se hace notar a través de productos de la corrosión sobre la superficie de la fractura. Esto puede dar una falsa indicación en algunos casos, ya que una superficie de fatiga usual puede algunas veces comerse antes de ser inspeccionada.

En general habrá una falla menos ramificada que en una falla debida a corrosión-esfuerzo regular.



Un flange de titanio que falla de un modo establecido por una "fatiga corrosiva".

Fig. 8 Falla de un metal por fatiga.

¿Como evitar la corrosion por fatiga?

No se sabe mucho acerca de la corrosión por fatiga. Los métodos para evitarla son usualmente preventivos, iniciándose con cambios de diseño, ya que es difícil para la propagación de una grieta una vez que se ha iniciado.

Corrosión por Fragilización de Hidrógeno

El término de Fragilización por hidrógeno se confunde frecuentemente con la corrosión de fractura por tensión, debido a que el hidrógeno desempeña una función en algunos casos de ésta y para distinguir la Fragilización por hidrógeno de la corrosión de fractura por tensión es conveniente juzgar los siguientes conceptos:

- a) La fractura debido al hidrógeno introducido en el metal sin corrosión de éste, por ejemplo en la protección catódica, no es definitivamente corrosión de fractura portensión.
- b) La fractura debido al hidrógeno producida por una alta velocidad de corrosión uniforme como en el decapado, tampoco es corrosión de fractura portensión porque no se necesita tener un esfuerzo mientras el hidrógeno se produce y la fractura se presenta posteriormente cuando la tensión es aplicada después de la reacción corrosiva con liberación de hidrógeno.

- c) Cuando el hidrógeno se produce por corrosión local en una fractura o picadura sobre un metal sometido a esfuerzo de tensión y resulta una propagación en la fractura, entonces sí se considera que la corrosión pertenece al tipo de corrosión de fractura portensión.

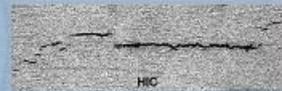


Fig. 9. Un tipo especial muestra una de las formas de la que se puede observar el hidrógeno que causa la corrosión por fragilización de hidrógeno.

¿Como evitar este tipo de Corrosión?

Evitando la evolución de hidrógeno o cambiando el material por uno en donde el hidrógeno no difunda en su estructura.

Corrosión Microbiológica

La corrosión microbiológica se presenta por lo general en ductos ya sea en el subsuelo o fuera de él, en plantas de tratamiento de aguas negras, así como en barcos. Factores como la concentración de oxígeno disuelto, pH, temperatura, concentración de cloruros y sulfatos, agitación y velocidad del medio, contaminación del medio, etcétera favorecen el medio ambiente de bacterias sulfuroductoras.

La corrosión microbiana puede definirse como un proceso metabólico bacteriano que origina o acelera la destrucción de los metales.

¿Cómo evitar la corrosión microbiológica?

Los microorganismos no pueden desarrollarse más que en determinadas condiciones de pH. Para cada grupo microbiano existen un pH límite y un pH óptimo. En general, los medios neutros convienen a las bacterias heterótrofas que pueblan los medios naturales. Los límites de crecimiento de estas bacterias oscilan entre los pH de 5.5 a 8.5 o 9. Ciertas especies, como el *Thiobacillus*, se cultivan a pH muy bajos, de entre 1.8 y 2. La corrosión anaerobia se considera posible en valores de pH comprendidos entre 5.5 y 8.5.

Ante lo expuesto en el párrafo anterior una forma de evitar este tipo de corrosión es la de controlar el pH en intervalos donde las bacterias no puedan vivir.

TABLA DE LOS TIPOS DE CORROSIÓN

CORROSIÓN	CAUSAS/EFECTOS	PROCESOS DE CORROSIÓN	PROYECTOS DE CORROSIÓN	EFECTOS DE CORROSIÓN	CONSEJO DE LA FTA
GENERAL	Ataque uniforme sobre toda la superficie.	Forma de oxidación y reducción.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	No utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
LOCALIZADA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
SELECCIONADA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
INTERFERENTE	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
BIOLÓGICA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
EROSIÓN	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.

TABLA DE LOS TIPOS DE CORROSIÓN

CORROSIÓN	CAUSAS/EFECTOS	PROCESOS DE CORROSIÓN	PROYECTOS DE CORROSIÓN	EFECTOS DE CORROSIÓN	CONSEJO DE LA FTA
GENERAL	Ataque uniforme sobre toda la superficie.	Forma de oxidación y reducción.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	No utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
LOCALIZADA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
SELECCIONADA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
INTERFERENTE	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
BIOLÓGICA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
EROSIÓN	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.

TABLA DE LOS TIPOS DE CORROSIÓN

CORROSIÓN	CAUSAS/EFECTOS	PROCESOS DE CORROSIÓN	PROYECTOS DE CORROSIÓN	EFECTOS DE CORROSIÓN	CONSEJO DE LA FTA
GENERAL	Ataque uniforme sobre toda la superficie.	Forma de oxidación y reducción.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	No utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
LOCALIZADA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
SELECCIONADA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
INTERFERENTE	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
BIOLÓGICA	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.
EROSIÓN	Ataque en puntos determinados de la superficie.	Ataque en puntos determinados.	Oxidación y reducción.	Formación de óxido de hierro que se acumula en la superficie.	Evitar utilizar metales que se oxidan fácilmente, utilizar materiales que se oxidan lentamente.

Unidad IV EVALUACION DE LA VELOCIDAD DE CORROSION

INSTRUCTOR

Dr. Victor E. Reyes Cruz

AUTOR

Israel Navarrete Ramírez

R. Q. M. Corrosión Metálica

EVALUACIÓN DE VELOCIDADES DE CORROSIÓN

Velocidad de Corrosión es una relación entre una unidad de magnitud sobre una unidad de tiempo y comúnmente se expresa como mpy (milésimas de pulgada por año, m in/año)

La velocidad de corrosión puede ser calculada a través de la corriente de corrosión, haciendo uso de la ley de Faraday y a través de la pérdida de peso que sufre un material.

Mediante la ley de Faraday

$$Q = n F m / M \quad \text{Eo. [1]}$$

Donde Q es la carga (C), F es la constante de Faraday (96,500 C/mol), n es el número de electrones transferidos, m es la masa del metal oxidado o reducido (g) y M es el peso molecular de material (g/mol)

Mediante la técnica gravimétrica de pérdida de peso la velocidad de corrosión en "milésimas" (1 milésima = 0.001in) de penetración por año (MPY) puede calcularse a partir de:

$$mpy = (534. W) / D \cdot A \cdot t$$

Donde:
W: Pérdida de peso en miligramos.
d : densidad en gramos/cm^3
A: área en pulgadas cuadradas.
t: tiempo en horas.

Resistencia a la Corrosión relativa	mpy	mil/año	µ/año	mm/a
Íntimo	<1	<0.02	<25	<2
Excelente	1-5	0.02-0.1	25-100	2-10
Buena	5-10	0.1-0.5	100-500	10-50
Pobre	20-50	0.5-1	500-1000	50-150
Rotura	50-100	1-5	1000-5000	150-500
Insoportable	200+	5+	5000	500+

Tabla 1. Comparación de MPY de corrosión con otros sistemas de medición de corrosión y otros factores que afectan a la medición de la velocidad de corrosión en la que se muestra el nivel de corrosión en la que se muestra el nivel de corrosión.

DIAGRAMAS DE POURBAIX

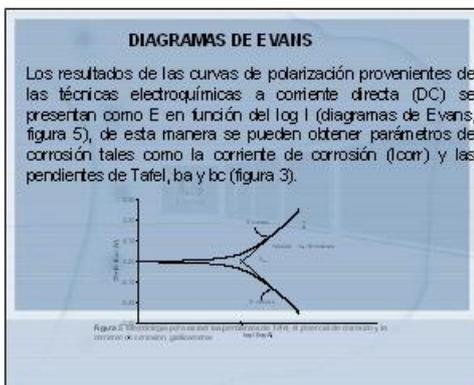
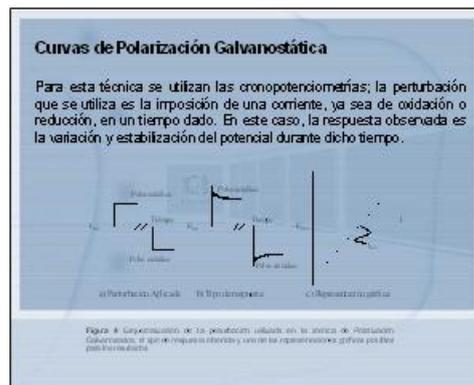
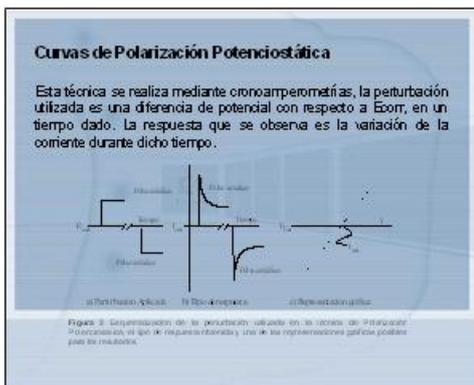
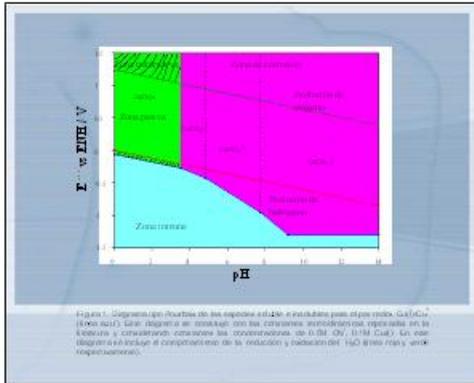
Los diagramas de potencial E /pH pueden entenderse como mapas que muestran las condiciones del poder oxidante de la solución (potencial) y la acidez o alcalinidad (pH) para las diferentes fases posibles presentes y estables en un sistema electroquímico acuoso.

Aplicaciones:

- Corrosión.
- Celdas de combustible.
- Baterías.
- Electroplataado.
- Metalurgia extractiva.

Corrosión en Metales

- Las áreas del diagrama de Pourbaix son a menudo etiquetadas con zonas pasivas, zonas sujetas a corrosión y zonas inmunes.
- La corrosión es posible en áreas del diagrama de Pourbaix donde los iones del metal son solubles y estables. El metal es posiblemente resistente a la corrosión o pasivo en áreas donde el óxido es estable.
- La zona pasiva, donde un óxido es estable, se puede transpasar por la evolución de oxígeno y hidrógeno.
- En áreas donde solamente la forma reducida del metal es estable, el metal es termodinámicamente inmune.



Aproximación a campo bajo

Para valores bajos de sobrepotencial η ($|\eta| < 0.05$ volt) donde la ecuación de Butler-Volmer se puede simplificar como:

$$i = i_0 \eta / RT$$

$$\eta = iRT / i_0 nF$$

Así que para sobrepotenciales pequeños la curva se puede considerar lineal y cumple con la ley de Ohm $\eta = iR$.

Aproximación a campo alto

Esta aproximación se aplica para cuando η es mayor o igual a 0.100 volt y cumple con la ley de Tafel:

$$\eta = a \pm b \log i \text{ (neta)}$$

MEDIDAS DE IMPEDANCIA

Espectroscopia de Impedancia Electroquímica

Esta técnica A.C. es una poderosa herramienta, adecuada para la caracterización in situ de materiales en ambientes corrosivos ya que la perturbación utilizada puede ayudar a separar las contribuciones de las diferentes etapas involucradas en el proceso global.

La impedancia, es una cantidad vectorial con magnitud $\Delta E/\Delta i$ y un ángulo de fase, " ϕ ". A partir de estos datos es posible construir curvas complejas con coordenadas polares, cuya abscisa se denomina impedancia real y la ordenada es la impedancia imaginaria.

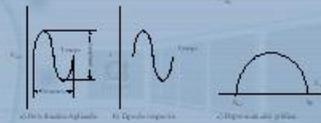


Figura 6. Separación de la perturbación utilizada en la técnica de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica. Tipos de respuesta obtenida y una de las representaciones gráficas de gran utilidad para los resultados.

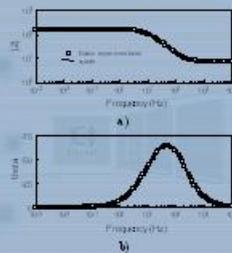


Figura 7. Diagrama de Bode para representar los resultados experimentales a) módulo b) ángulo de fase.

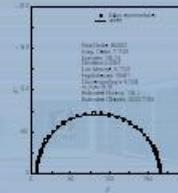


Figura 8. Ejemplo del Ajuste de los resultados experimentales a un modelo, los valores obtenidos se indican en la figura.

RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN

La Resistencia de polarización de técnicas electroquímica de DC, R_p , se obtiene a partir de las curvas I-E construidas con dichos resultados de las curvas de polarización. (figura 9).

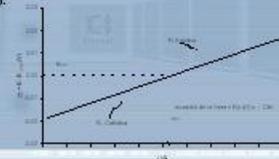


Figura 9. Método para evaluar la Resistencia de Polarización en DC.

PRUEBAS DE CORROSIÓN

Prueba de Humbre

Este tipo de evaluación de la velocidad de corrosión es más bien cualitativo y se lleva a cabo de acuerdo con el método técnico NACE TM. Para ello se preparan soluciones agresivas y se ponen en contacto con cupones cilíndricos que se encuentran rotando.

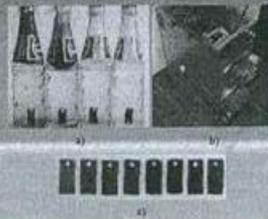


Figura 10. Equipo NACE TM para la evaluación de la corrosión. a) Cupón cilíndrico para la prueba de humbre, b) Soporte de corrosión.

Pérdida de Peso

Esta técnica es la más utilizada tanto en laboratorio como en la industria y se lleva a cabo mediante la colocación de un testigo metálico - de dimensiones y peso conocido - en contacto con un ambiente corrosivo. En laboratorio se utiliza el método de la rueda dinámica (ver figura 11), también conocido como pruebas de botella:

Figura 11. Método de la Rueda Dinámica. a) Depósito de los recipientes de corrosión en botellas que contienen el medio corrosivo. b) Equipo utilizado y el testigo de metal.



Resistencia Eléctrica

Esta técnica es ampliamente utilizada en campo. El equipo requerido es relativamente muy sencillo y portátil (modelo CK-3 de CORROSMETER®, figura 12), lo que lo hace versátil para uso general en campo o en laboratorio.

La operación del sistema de corrosómetro está basada en el hecho de que la conductividad de la mayoría de los metales es muy grande, mientras que la conductividad de los óxidos metálicos es despreciable, por comparación.

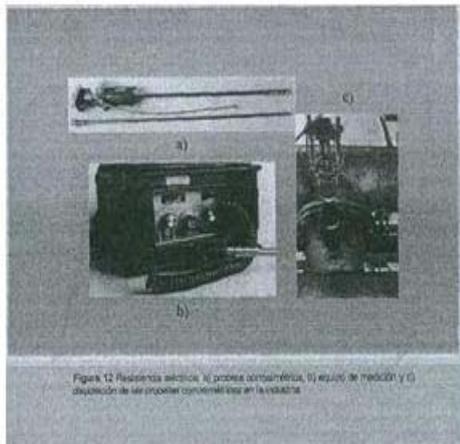


Figura 12. Resistencia eléctrica. a) probeta corrosométrica, b) equipo de medición y c) aplicación de la probeta corrosométrica en la industria.

MEDICIÓN DE LA CORROSIÓN EN PLANTAS DE PROCESO.

Las industria petrolera cuenta con procedimientos de trabajo que tiene la finalidad de controlar y prevenir la corrosión en sus equipos de proceso. Estos procedimientos son revisados continuamente para realizar mejoras en ellos y prever los daños que ocasiona la corrosión.

Los nombres de algunos de los procedimientos son mostrados en las siguientes imágenes:

Documentos Normativos vigentes				
Código	Título	Fecha	Edición	Estado
ISO 9001:2015	Manejo de la calidad	2015	1	Activo
ISO 9004:2015	Manejo de la excelencia	2015	1	Activo
ISO 14001:2015	Manejo ambiental	2015	1	Activo
ISO 45001:2018	Seguridad y salud en el trabajo	2018	1	Activo
ISO 50001:2018	Energía	2018	1	Activo
ISO 55000:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55001:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55002:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55010:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55011:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55012:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55013:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55014:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55015:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55016:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55017:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55018:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55019:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55020:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55021:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55022:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55023:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55024:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55025:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55026:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55027:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55028:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55029:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55030:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55031:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55032:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55033:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55034:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55035:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55036:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55037:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55038:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55039:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55040:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55041:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55042:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55043:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55044:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55045:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55046:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55047:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55048:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55049:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55050:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55051:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55052:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55053:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55054:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55055:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55056:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55057:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55058:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55059:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55060:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55061:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55062:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55063:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55064:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55065:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55066:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55067:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55068:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55069:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55070:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55071:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55072:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55073:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55074:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55075:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55076:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55077:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55078:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55079:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55080:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55081:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55082:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55083:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55084:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55085:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55086:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55087:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55088:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55089:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55090:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55091:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55092:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55093:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55094:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55095:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55096:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55097:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55098:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55099:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55100:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo

Código	Título	Fecha	Edición	Estado
ISO 9001:2015	Manejo de la calidad	2015	1	Activo
ISO 9004:2015	Manejo de la excelencia	2015	1	Activo
ISO 14001:2015	Manejo ambiental	2015	1	Activo
ISO 45001:2018	Seguridad y salud en el trabajo	2018	1	Activo
ISO 50001:2018	Energía	2018	1	Activo
ISO 55000:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55001:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55002:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55010:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55011:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55012:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55013:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55014:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55015:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55016:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55017:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55018:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55019:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55020:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55021:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55022:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55023:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55024:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55025:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55026:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55027:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55028:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55029:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55030:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55031:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55032:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55033:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55034:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55035:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55036:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55037:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55038:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55039:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55040:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55041:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55042:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55043:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55044:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55045:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55046:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55047:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55048:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55049:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55050:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55051:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55052:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55053:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55054:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55055:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55056:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55057:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55058:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55059:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55060:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55061:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55062:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55063:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55064:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55065:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55066:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55067:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55068:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55069:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55070:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55071:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55072:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55073:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55074:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55075:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55076:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55077:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55078:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55079:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55080:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55081:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55082:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55083:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55084:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55085:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55086:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55087:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55088:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55089:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 55090:2018	Manejo de activos	2018	1	Activo
ISO 5509				

Unidad V PROTECCION CONTRA LA CORROSION

Dr. Victor E. Reyes Cruz

Israel Navarrete Ramirez

REVESTIMIENTOS

- ORGÁNICOS
- E
- INORGÁNICOS

RECUBRIMIENTOS ORGÁNICOS

Se utilizan comúnmente para mejorar la resistencia a la corrosión.

La expresión *recubrimientos orgánicos*, incluye las películas orgánicas, tales como pinturas, resinas, barnices, grasa, placas adhesivas de material plástico, y otros materiales similares.

Algunos de los recubrimientos orgánicos, como las pinturas tienen probabilidades de contener materiales inorgánicos; el material predominante es orgánico.

Puesto que los recubrimientos son orgánicos, se descomponen a temperaturas elevadas.

Dichos recubrimientos se recomiendan principalmente para usarse a temperaturas inferiores a las de la ebullición del agua.

FORMULACIÓN.

El ingrediente fundamental en la mayoría de los recubrimientos orgánicos, es un polímero o una mezcla de polímeros.

Las funciones principales de estos son:

- Protección del material contra la corrosión, la exposición a altas temperaturas y la intemperie.
- Mejoramiento de la visibilidad por luminiscencia, y de la reflectividad.
- Aislamiento eléctrico.
- Mejoramiento de la apariencia.

Los recubrimientos orgánicos siempre contienen un **vehículo**, y con frecuencia, contienen también **pigmentos** y **secadores**.

El vehículo contiene una sustancia aglutinante, que forma la película y que mantiene unidas a las partículas del pigmento, cuando se encuentra presente.

El vehículo incluye también al **adelgazador**, que es un solvente volátil que facilita la aplicación del producto.

Los pigmentos alteran la apariencia, así como también las propiedades físicas de la película y, a veces, también las químicas.

Los secadores son catalizadores para el endurecimiento de la película, una vez aplicada.

Vehículos

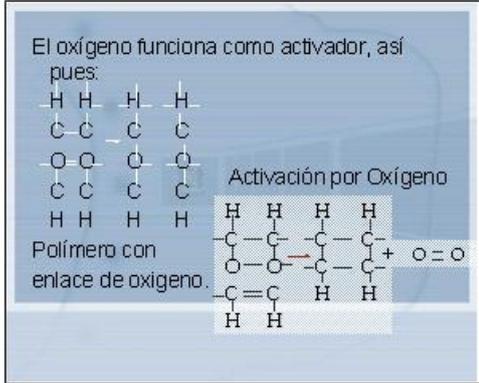
Las diferencias principales entre las pinturas dependen del tipo de aglutinante que se utiliza en el vehículo.

La naturaleza de la sustancia aglutinante determina el mecanismo y hasta cierto punto, la rapidez del endurecimiento, la resistencia y la durabilidad de la película endurecida.

Numerosos aceites vegetales *naturales*, conocidos como *aceites secadores*, son muy útiles como aglutinantes.

Estos aceites, los más importantes de los cuales son el de linaza y el de pino, son ácidos grasos no saturados.

Cuando quedan expuestas estas sustancias al oxígeno del aire, se forman mediante la adición simple, para formar polímeros con enlaces de oxígeno, o mediante la medición del oxígeno, seguida de una polimerización de tipo de adición.



Los pigmentos

Las partículas de los pigmentos provocan un aumento de la durabilidad y de la resistencia de las partículas que las contienen.

Algunos pigmentos, como el cromado de zinc y el plomo rojo, son útiles debido a que mejoran la pasividad de ciertas superficies metálicas. En superficies porosas, el pigmento controla la absorción del adelgazador, mejorando el rendimiento.

Los pigmentos son de dos tipos diferentes: blancos y de color.

La capacidad encubridora de los pigmentos blancos aumenta al incrementarse su índice de refracción.

La capacidad de encubrimiento de los pigmentos de color dependen de su capacidad para absorber la luz.

Estos pueden clasificarse también como sustancias orgánicas e inorgánicas.

Las inorgánicas incluyen a materiales tales como el óxido de zinc, el plomo blanco, el óxido de titanio, el negro de carbono, el verde de cromo, y el amarillo de cromo.

Las sustancias orgánicas importantes son productos químicos orgánicos, sintéticos y complejos, similares a los tintes.

Los secadores

Son productos que se añaden a ciertos materiales orgánicos de recubrimiento, para acelerar el endurecimiento de la película mediante la polimerización y/o la oxidación. Habitualmente son sustancias jabonosas, producidas mediante la sustitución del hidrógeno, de ciertos ácidos orgánicos con metales, tales como Pb, Mn, Co, Fe, Zn y Ca.

Básicamente son catalizadores para las reacciones involucradas en el secado. No son útiles en los recubrimientos orgánicos que se endurecen mediante una simple evaporación.

Los secadores

En los aditivos diversos se incluyen materiales con propiedades antisépticas, para impedir que el producto formulado sufra ataques de materias y mohos. Asimismo, en las pinturas de base de agua, es frecuente encontrar agentes antiespumantes, agentes de dispersión y estabilizadores de las emulsiones.

Tipos principales

Las denominaciones comunes para seis tipos principales de recubrimientos orgánicos son:

- Pintura.
- Pintura de agua.
- Berriz.
- Esmalte.
- Laca.
- Goma de laca.

Las diferencias principales entre estos materiales pueden atribuirse a los distintos tipos de vehículos de cada uno de ellos. Otra diferencia esta en que si el material esta o no pigmentado.

RECUBRIMIENTOS INORGÁNICOS

Incluyen materiales de cerámica, tales como los vidrios. Buenos ejemplos son los utensilios de cocina esmaltados, las tinajas del baño y lavabos. Esas cubiertas son eficaces a causa de la exclusión de medios corrosivos. Resisten temperaturas muy por encima de las que provocan que los recubrimientos orgánicos pierdan su eficiencia. Aunque los recubrimientos inorgánicos son duros y resistentes al desgaste, son frágiles y se encuentran sujetos a daños causados por choques térmicos.

RECUBRIMIENTOS INORGÁNICOS

1.- Esmaltes Inorgánicos.

2.- Fluoruros.

3.- Vidrio Soluble.

4.- Revestimiento De Cemento.

5.- Recubrimiento Con Pastas Cerámicas Y Refractarias.

PROTECCION METÁLICA

Es imposible prevenir el deterioro de las partes metálicas con el tiempo, aunque la degradación superficial causada por fenómenos mecánicos o químicos no pueden evitarse, el tratamiento superficial puede ser la única forma de proporcionar a una pieza las propiedades de resistencia a la corrosión que garantiza un tiempo de razonable de servicio.

La deposición de un metal químicamente inactivo sobre una pieza, puede ser necesario para reducir al mínimo los destrozos del ataque corrosivo, o bien el endurecimiento puede ser la única manera de resolver un problema de desgaste por abrasión.

Proteccion superficial

- Galvanización (electroplastia)
- Anodizado
- Fluidizado de metales
- Pulido electromecánico
- Revestimiento con metal duro
- Carburizado
- Endurecimiento por inducción
- Nitruración
- Cementación en baños de sales
- Cianuración y carbonitruración
- Endurecimiento a la fama

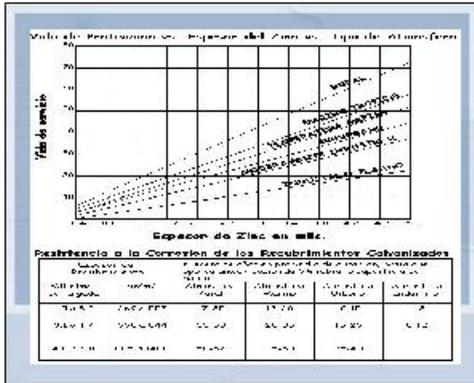
Galvanización

Usado para mejorar las propiedades superficiales de desgaste y corrosión, entraña la aplicación de un revestimiento metálico, por deposición eléctrica.

Su función principal es mejorar el acabado superficial reduciendo el coeficiente de fricción y protegiendo al metal del ambiente corrosivo

- Para la selección de un metal se considera la posición de la serie electroquímica de actividad
- Entre los diferentes metales usados en la galvanización son: Cd, Zn, Cr, Cu, Ni, Sn.
- Las propiedades de cada uno de estos varía por lo que se precisa una elección adecuada





Anodizado

El Anodizado consiste en aumentar –por medios electroquímicos (oxidación anódica)- la capa de óxido de aluminio que se forma espontáneamente. De este modo se aumenta la resistencia a los agentes químicos y atmosféricos, al mismo tiempo que aumenta la dureza superficial de la capa.

- Este revestimiento posee propiedades de aislamiento térmico.
- Puede teñirse o colorear.
- Es aplicable en lugares donde se desea tanto protección anticorrosiva como decorativa.

Fluidizado De Metales

Se usa una flama de oxiacetileno o de oxígeno en la cual se alimenta a un alambre o un metal en polvo, el resultado es un rocío de partículas de metal fundido que puede ser dirigido hacia la superficie de una pieza metálica formando un recubrimiento de partículas.

Metales empleados son: Ni, Al, Cd, Cu, Sn, Pb y acero inoxidable, teniendo cuidado de conservar un área favorable quedando una superficie porosa y se presta a la aplicación de pinturas.

Puede aplicarse más de 1 metal en una capa para la combinación de propiedades.

Revestimiento Con Metales Duros

- PRIMER MÉTODO:** se usa un soplete de oxiacetileno y una barra de soldadura compuesta del metal que se ha de aplicar.
- SEGUNDO MÉTODO:** se usa una soldadora de arco metálico y el metal del revestimiento como electrodo.

Ventajas y desventajas

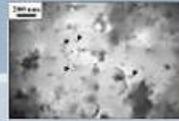
- El primero la flama logra adicionar más carbono y logra superficies más uniformes.
- La soldadora produce una superficie menos uniforme y quema carbono de el revestimiento.

Carburizado

La Cementación o Carburización, es uno de los métodos más antiguos para producir un endurecimiento en la superficie de piezas de acero. En este tratamiento, el metal ferroso es expuesto a una atmósfera rica en carbono lo que promueve la adsorción y posterior difusión del carbono en la superficie del metal.

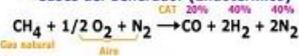
Este proceso permite obtener piezas con el corazón blando y la periferia endurecida y se realiza cuando se requiere incrementar el contenido de carbono en la periferia de la pieza, como consecuencia la atmósfera reactiva (N₂-MeOH) empleada en este proceso, deberá proteger al acero de la oxidación y proveer de carbono suficiente para incrementar su contenido en la superficie.

Este incremento, se basa en la adsorción y posterior difusión del carbono en el acero a altas temperaturas, una vez que la penetración del carbono sea la deseada, se retira la pieza templándola o bien normalizándola.

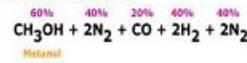


FUNDAMENTOS DEL CARBURIZADO

* Gases del Generador (Endotérmico)



* Gases Industriales



Piezas de acero cementadas en el horno para producir un endurecimiento en la superficie.

Endurecimiento por Inducción

El método de calentamiento por inducción se utiliza de calentamiento por inducción son una fuente de alimentación de CA, una bobina de inducción y la pieza que se va a calentar. La fuente de alimentación transmite corriente alterna por la bobina, con lo que se genera un campo magnético. Cuando se coloca la pieza dentro del campo magnético de la bobina, aparecen corrientes por efecto de la inducción en su interior, generándose calor puro en cantidades precisas y localizadas sin que exista un contacto físico directo.

Al alcanzar altas temperaturas que permita el endurecimiento por templeado se puede lograr un endurecimiento selectivo o completo pero el contenido de C deberá ser lo mas bajo posible a fin de reducir el agrietamiento



2.5. MATERIAL AUXILIAR.

Como se menciona anteriormente para no desviar la atención del lector, a continuación como complemento a este modelo de enseñanza aprendizaje para la asignatura de **Corrosión y Degradación** de materiales se presenta este material auxiliar, el cual consta de imágenes ilustrativas acerca del fenómeno de corrosión y degradación así como de trabajos de congreso de la SMEQ.





Formación de productos de corrosión de naturaleza protectora, sobre acero 1018 en ambientes amargos alcalinos.

P. Galicia*, I. González

Departamento de Química, Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa,
qgalicia@yahoo.com.mx

J. Avalos, N. Casillas

Universidad de Guadalajara, Departamento de Química

RESUMEN

En este trabajo se formaron películas de productos de corrosión típicos del *Medio Amargo Alcalino* (0.1M de $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ y 10ppm de CN^-) sobre acero al carbono 1018, en presencia de dos químicos inhibidores diferentes: Imidazolina Hidroxioleica y Aminoéter. Estas películas se formaron de manera artificial mediante la aplicación de un programa de pulsos de potencial óxido – reducción. Las respuestas de carga en función del tiempo de formación de las películas, revelaron que ambos inhibidores disminuyen la oxidación del acero hasta un mínimo de carga (u concentración óptima de inhibidor).

La posterior caracterización de las películas crecidas en presencia de los inhibidores con las técnicas de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) y Microscopia Electroquímica de Barrido (SECM), mostraron que cada químico inhibidor forma productos de corrosión con diferentes propiedades fisicoquímicas; en el caso de la película en la cual se utilizó la Imidazolina, se observa una mayor conductividad electrónica y un mayor impedimento de los procesos difusionales que se llevan a cabo a través de la película (difusión de Fe^{+2} e H^0), mientras que en el caso del Aminoéter se observa un comportamiento diferente.

1. INTRODUCCIÓN

Los antecedentes de este tipo de corrosión, han revelado que los productos de corrosión que se forman inicialmente son más densos y homogéneos, de manera que son de naturaleza protectora, y van perdiendo esta propiedad conforme evolucionan los daños al permanecer en contacto con el medio corrosivo (Edwards y col. 1994, Olsson y col. 2000, Rammelt y col. 2003); al no poderse estabilizar los sulfuros primarios, se recurre a la utilización de inhibidores que minimicen la corrosión.

Se sabe que las imidazolinas funcionan como inhibidores en estos medios, por que se adsorben sobre el acero, y al parecer forman una barrera impermeable entre el metal y el medio corrosivo (Olsson y col. 2000, Rammelt y col. 2003); sin embargo no es claro el mecanismo por el cual actúan, ya sea por una disminución del área activa, o por cambios estequiométricos de los productos de corrosión; además, se ha observado que existe una concentración en la que el inhibidor protege al máximo al acero, y a concentraciones inferiores o mayores, esta protección disminuye.

En el presente trabajo se hace uso de las técnicas electroquímicas para simular los daños producidos por la corrosión en el medio básico amargo, en presencia de dos diferentes inhibidores proporcionados por el IMP: Imidazolina Hidroxioleica y Aminoeter; el estudio de las propiedades fisicoquímicas de estos daños creados artificialmente, nos introducirá a los mecanismos de inhibición, en los que se profundizará a futuro con la ayuda de técnicas espectroscópicas.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1 Preparación del electrodo de ACERO 1018

Para la formación artificial de los productos de corrosión es necesaria una celda con arreglo de tres electrodos: electrodo de referencia de sulfato mercurioso saturado (SSE), barra de grafito como contra electrodo, y un disco de Acero al Carbono 1018 con un área activa de 0.502 cm^2 como electrodo de trabajo. Previo al crecimiento de las películas, es necesario homogeneizar la superficie del electrodo de trabajo, mediante un pulido con una lija de carburo de silicio de grado 400, seguido de otro pulido con una lija del mismo tipo, pero de grado 600, lavándose después con agua des-ionizada en un baño de ultrasonido durante 2 minutos.

2.2 Formación de los productos de corrosión sobre el ACERO 1018

La manera en que se forman las películas es la siguiente: el electrodo de trabajo es sumergido en una solución del medio amargo alcalino concentrado, o solución de crecimiento: 1M de $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ y 500 ppm de CN^- , como NaCN, en presencia del inhibidor. Posteriormente se aplica un programa de pulsos de potencial que consiste en un pulso de 0.2 V más positivo que el potencial de corrosión (E_{corr}), durante 5 segundos, seguido de



otro pulso de 0.2 V más negativo que el E_{corr} durante 2 segundos, para completar un ciclo de 7 segundos (fig. 1).

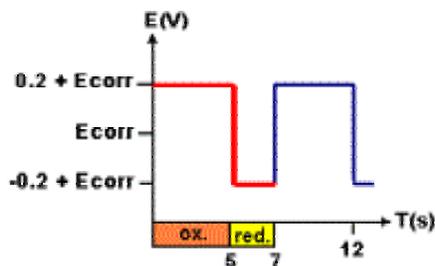


Figura 1. Se muestra uno de los 86 ciclos de oxidación-reducción que forman el programa completo de pulsos de potencial utilizado en la formación de los productos o películas de corrosión.

El programa de crecimiento de pulsos de potencial de oxidación-reducción se repitió 86 veces (10 minutos). Se formaron tres tipos de películas:

- Sin inhibidor (película blanco)
- En presencia de Imidazolina Hidroxioleica (IH)
- En presencia de Aminoéter (AE)

2.3 Caracterización de los productos de corrosión por EIS

Para obtener los espectros de impedancia se utilizó la misma celda con arreglo de tres electrodos que se empleó en la formación de las películas, pero, con un medio amargo alcalino diluido o de caracterización (0.1M de $(\text{NH}_4)_2\text{S}$ y 10 ppm de CN^- , como NaCN). Las condiciones fueron las siguientes:

- Barrido de frecuencias de 10000 – 0.01 Hz,
- Amplitud de 10 mV del E_{corr} .
- Temperatura de la solución 20⁰ celcius.

2.4 Caracterización de los productos de corrosión por SECM

Con el SECM se utiliza un sustrato (depositado sobre un conductor), que en nuestro caso es la película de productos de corrosión, como un electrodo de trabajo 1, en el que se impone un potencial A, de manera que reacciona electroquímicamente con un electrolito de trabajo en solución E, lo que genera un producto E^* que reacciona nuevamente, pero con un electrodo de trabajo 2 en el cual se ha impuesto un potencial B para regenerar la especie E, además este electrodo barre la superficie del electrodo 1. La corriente involucrada en la reacción $E^* \rightarrow E$ es una manera indirecta de determinar las propiedades de conducción eléctrica del sustrato (fig. 2).

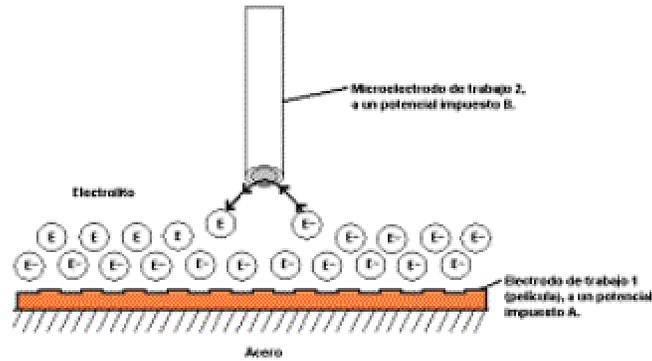


Figura 2. Representación del mecanismo de funcionamiento de la técnica de SECM.

Para caracterizar las películas crecidas en presencia de los inhibidores, se utilizó una celda con arreglo de tres electrodos, como electrolito de reacción $K_3[Fe(CN)_6]$ 0.1 M, como referencia un electrodo de calomel (SCE), y como electrodo de barrido una microfibras de carbono (Hernández, 2001). Las condiciones experimentales fueron las siguientes:

- - 570 mV vs. SCE para el microelectrodo de fibra de carbono.
- - 750 mV vs. SCE para la película de productos de corrosión.
- Temperatura de 20^o c.
- Área de barrido 8000 micras x 8000 micras.
- Velocidad de barrido 350 micras/segundo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Análisis de la formación de las películas de productos de corrosión en presencia de Inhibidor

En el siguiente gráfico (fig. 3) está representada la carga total involucrada en el tiempo de formación de cada película, en función de la concentración del componente químico correspondiente presente en el medio concentrado de crecimiento (IH ó AE). En todos los casos se observa cómo cada químico disminuye las cargas de oxidación, hasta una concentración óptima (o mínimo de carga), a partir de la cual se favorece la oxidación del acero conforme aumenta su concentración en el medio de crecimiento; las concentraciones óptimas encontradas para las películas crecidas en presencia de la IH y el AE, son 2 y 4 ppm respectivamente. De manera que con esta técnica es posible dar una evaluación primaria de una especie química candidata a inhibidor de corrosión.

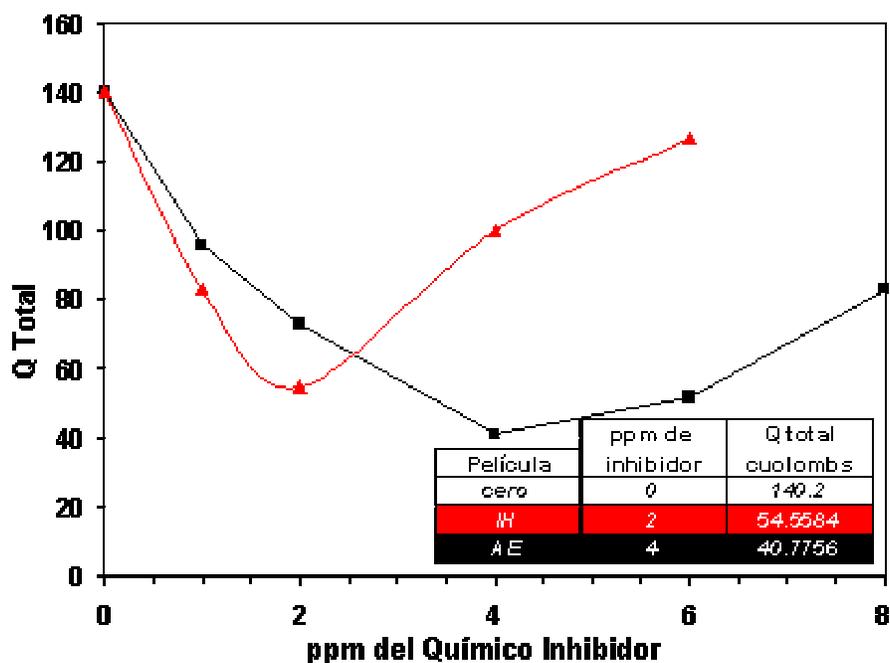


Figura 3. Carga total involucrada en el proceso de formación de las películas de corrosión crecidas sobre acero al carbono 1018 en el medio 1M de $(NH_4)_2S$ y 500 ppm de CN, en presencia de la IH y el AE.

3.2 Caracterización por EIS de las películas de productos de corrosión crecidas en presencia de inhibidor

En los diagramas de Nyquist obtenidos para las películas crecidas en presencia de los inhibidores por separado, se observa que para la IH (fig. 4a), los valores de la impedancia imaginaria, aumentan conforme aumenta la concentración, alcanzándose el máximo y un comportamiento lineal a una concentración de 2 ppm, típico de comportamientos difusionales; cuando se agrega un exceso de IH en el medio de crecimiento (4 ppm), se obtiene un comportamiento idéntico al de 1ppm, indicando que la acción inhibitoria debida a la IH ha desaparecido .

Los espectros de impedancia de las películas crecidas en presencia del AE (fig. 4b), presentan curvaturas más definidas (bucle) que las observadas con la IH, estos bucles son similares entre si en altas frecuencias, sin embargo se aprecian sensibles modificaciones en la parte real de los espectros a bajas frecuencias, definiéndose un máximo a una concentración de 4 ppm.

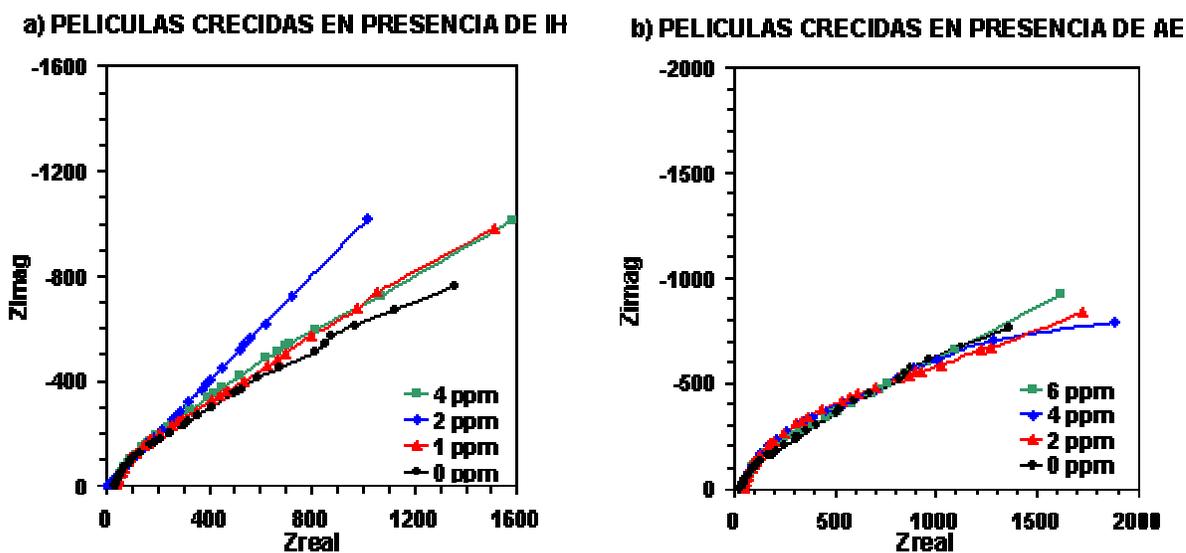


Figura 4.- Diagramas de Nyquist obtenidos en el medio amargo de caracterización 0.1M de $(NH_4)_2S$ y 500 ppm de CN^- , para las películas de productos de corrosión, que fueron previamente crecidas sobre acero al carbono 1018, en presencia de distintas concentraciones de IH (a) y AE (b).

3.2.1 Simulación de los espectros de EIS de caracterización, mediante circuitos equivalentes

Para las simulaciones de los espectros de EIS de las películas crecidas con la FIH y sus componentes, se utilizó el circuito equivalente que se muestra en la figura 5, el cual ya ha sido utilizado con anterioridad en la evaluación del mecanismo de corrosión en el medio básico amargo (Cabrera y col. 2000, Sosa y col. 2002, Sosa 2002), se espera que este modelo sea capaz de explicar los mecanismos de inhibición en términos de los componentes eléctricos presentes.

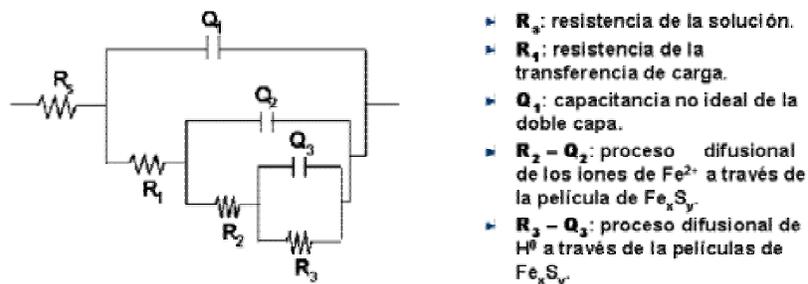


Figura 5.- Circuito equivalente utilizado para describir las modificaciones que sufre el mecanismo de corrosión del acero al carbono 1018 en el medio amargo alcalino, debido a la adición de los químicos inhibidores.

La tabla I resume los valores de los componentes eléctricos, que simulan los espectros de EIS de las películas crecidas en presencia de la IH. Los cambios en la resistencia de la solución (R_s) obtenidos en los diferentes experimentos, varían en el intervalo de 33 – 36 Ω , indicando que las películas no son modificadas por el medio de caracterización. Los valores de la resistencia a la transferencia de carga (R_1) disminuyen con la presencia de la IH en el medio de crecimiento con respecto a la película blanco (89 – 23 Ω), de manera que la oxidación del acero en la interfase acero-película, se ve más favorecida debido a la presencia de este inhibidor. Los valores de n_1 que son una función de distribución (con valores entre 0 y 1), que indica que tan lejos (0), o que tan cerca (1), se encuentra la interfase de ser tratada como un capacitor ideal, se encuentran en el intervalo de 0.74 – 0.86, indicando que las superficies de las películas son heterogeneas. Al calcular los valores de las pseudocapacitancias en altas frecuencias (C_{HF}) de los elementos de fase constante Q_1 , con la expresión de Boukamp (1993); muestran que no hay modificaciones apreciables de la capacitancia de la doble capa electroquímica. Esto podría indicar que existen modificaciones en la composición química, grosor y/o porosidad de las películas, de una manera tal, que un cambio en alguna de ellas es compensado por cambios en las otras dos, manteniendo así un valor constante de la doble capa, este planteamiento se puede corroborar al comparar los procesos difusionales de hierro e hidrógeno, los cuales se esperaría que cambiara a la par, ya que su magnitud depende del grosor y la porosidad de la película. Sin embargo, se observa que la difusión de los cationes de hierro es más favorecida a una concentración de 2 ppm de IH (ver las magnitudes de R_2 y Q_2 de la tabla 1), mientras a esta misma concentración, la difusión del hidrógeno atómico se ve más impedida como se observa en los valores de R_3 y Q_3 , de tal manera que el aumento en las magnitudes de los espectros de EIS (aumento en la pasividad de la película), recae principalmente sobre la difusión del hidrógeno.

De esta manera se corrobora que efectivamente la IH modifica los procesos de absorción del H^0 que forman las ampollas del acero, esto sustenta de manera cuantitativa, las suposiciones empíricas que se le asocia a la IH, con la inhibición del ampollamiento del acero, observado con los cupones de pérdida de peso.

Tabla I - Componentes eléctricos obtenidos a partir de los EIS de caracterización, de las películas que fueron crecidas en presencia de la IH en el medio amargo concentrado.

ppm de IH	Q1					Q2			Q3		
	R_s (Ω)	R_1 (Ω)	Y_0 (mho.s ⁿ)	n_1	C_{HF} (F)	R_2 (Ω)	Y_0 (mho.s)	n_2	R_3 (Ω)	Y_0 (mho.s)	n_3
0	33	89	5.4×10^{-4}	0.74	1.8×10^{-4}	352	2.3×10^{-4}	0.88	3534	2.4×10^{-3}	0.56
1	36	23	3.8×10^{-4}	0.86	1.7×10^{-4}	232	1.1×10^{-4}	0.93	9536	1.8×10^{-3}	0.46
2	36	29	4.3×10^{-4}	0.81	1.5×10^{-4}	155	4.2×10^{-5}	1	8535	1.3×10^{-3}	0.41
4	36	28	3.8×10^{-4}	0.86	1.8×10^{-4}	114	6.9×10^{-5}	1	8111	1.5×10^{-3}	0.44

Para el caso de los componentes eléctricos encontrados para simular el espectro de caracterización de las películas crecidas en presencia del AE (tabla II), se observa un

aumento en el valor de la R_s (de 33 hasta 45 Ω), como se trata del mismo medio de caracterización utilizado con la IH, este ligero aumento en la R_s , se debe a que las películas crecidas en presencia del AE son eléctricamente más resistivas y por ende más protectoras. De igual manera se observa un aumento de un orden de magnitud en la R_1 , para las películas crecidas con 2 y 4 ppm de AE (798 y 779 Ω respectivamente) con respecto a la película blanco (89 Ω), indicando que la oxidación del acero en la interfase acero-película se ve más impedida. En lo que respecta a los valores de las C_{HF} se observa un ligero incremento con respecto a la película que no contiene inhibidor. Sin embargo, esta pequeña modificación es suficiente para provocar un comportamiento irregular de los procesos difusionales de los cationes de hierro e Hidrógeno atómico.

En este caso, el proceso difusional de hierro permanece prácticamente constante, como lo demuestran los valores de R_2 y Q_2 , no así la difusión del hidrógeno, ya que en el caso en el que utilizó 4 ppm de AE en el medio de crecimiento de la película, la difusión del hidrógeno se ve más favorecida como lo demuestra el valor de R_3 , de manera que la presencia del AE en el medio de crecimiento, asiste en la formación de una película con propiedades menos conductoras (electrónicamente), como lo revelan los valores de R_s y R_1 .

Tabla II - Componentes eléctricos obtenidos a partir de los EIS de caracterización, de las películas que fueron crecidas en presencia del AE en el medio amargo concentrado.

ppm de AE	Q1			Q2			Q3				
	R_s (Ω)	R_1 (Ω)	Y_o (mho.s)	n_1	C_{HF} (F)	R_2 (Ω)	Y_o (mho.s)	n_2	R_3 (Ω)	Y_o (mho.s)	n_3
0	33	89	5.4×10^{-4}	0.74	1.8×10^{-4}	352	2.3×10^{-4}	0.88	3534	2.4×10^{-3}	0.56
2	45	798	5.6×10^{-4}	0.82	4.7×10^{-4}	354	1.5×10^{-8}	1	3570	3.3×10^{-3}	0.56
4	43	779	5.2×10^{-4}	0.83	4.3×10^{-4}	389	1.6×10^{-8}	1	1753	3.3×10^{-3}	0.71
6	44	52	4.8×10^{-4}	0.83	2.3×10^{-4}	370	4.7×10^{-6}	1	4750	2.1×10^{-3}	0.52

3.3 Caracterización por SECM de las películas de productos de corrosión crecidas en presencia de las cantidades óptimas de inhibidor

La caracterización por SECM de las películas crecidas con las cantidades óptimas de los diferentes inhibidores (IH 2 ppm, AE 4 ppm) en el medio $K_3[Fe(CN)_6]$ 0.1 M se presentan en las siguientes figuras (6-8). Se observan las tendencias de los perfiles de actividad de corriente eléctrica a través de las películas mediante un código de colores que va desde el azul hasta el rojo, los cuales simbolizan las zonas de pasividad (azul) o de alta actividad electroquímica (rojo) en donde constantemente se reduce y oxida el ión $[Fe(CN)_6]^{3-}$ sobre la película de productos de corrosión y del electrodo de barrido, respectivamente.

En la película blanco (fig. 6) se observan desfases de corriente paralelos al eje de barrido (x) debido al tamaño del electrodo de barrido, además de ligero desplazamiento

hacia la derecha de la actividad electroquímica de la película (efecto convectivo), debido al tamaño del electrodo y a la velocidad de barrido. Se distingue una homogeneidad parcial en los perfiles de corriente de la película (zona color rojo), indicando la película de productos de corrosión formada artificialmente se encuentra sobre toda la superficie del acero con una actividad electroquímica homogénea, la cual presenta una corriente máxima de 11 nA.

En el caso de la película crecida en presencia de la IH (fig. 7), se observa un fenómeno convectivo más pronunciado, sin embargo, se observa claramente que el perfil de corriente es totalmente homogéneo alcanzando una corriente máxima de 48 nA, lo cual quiere decir, que de nuevo el acero se encuentra totalmente cubierto por la película de productos de corrosión, cuya conducción electrónica se ve más favorecida que la observada en la película crecida sin inhibidor, lo cual concuerda con los valores de la resistencia a la transferencia de carga R_1 obtenidos de las simulaciones correspondientes a estas películas (tabla 1), de manera que se corrobora que la inhibición debida a la IH se debe al impedimento de la difusión de hidrógeno.

Por último, la película crecida en presencia de 4 ppm de AE, presenta un perfil de corrientes heterogéneo, ya que como se puede observar en la figura 8, se presenta una zona de pasividad en color azul que cubre la mayor parte del, y otra zona en color rojo la cual presenta propiedades de conducción eléctrica, cuya máximo de corriente es de aproximadamente 25 nA. Este comportamiento denota, que existen por lo menos 2 tipos diferentes de películas de productos de corrosión cubriendo la superficie del acero, una de naturaleza no conductora, la cual corroboraría los valores obtenidos de la resistencia a la transferencia de carga R_1 de la tabla 2, y otra película de naturaleza más activa diferente a la película crecida sin inhibidor.

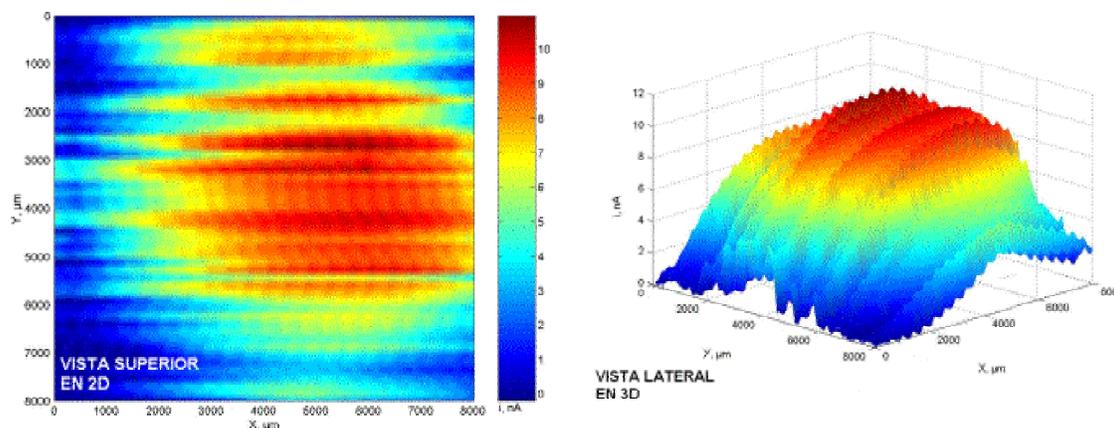


Figura 6.- Perfiles de corriente de la actividad electroquímica de la película sin ningún inhibidor en el medio amargo concentrado. La zona roja representa un máximo de corriente eléctrica, y la azul oscura representa una zona de inactividad, se observa que la película cubre por completo la superficie del acero y presenta una actividad homogénea.

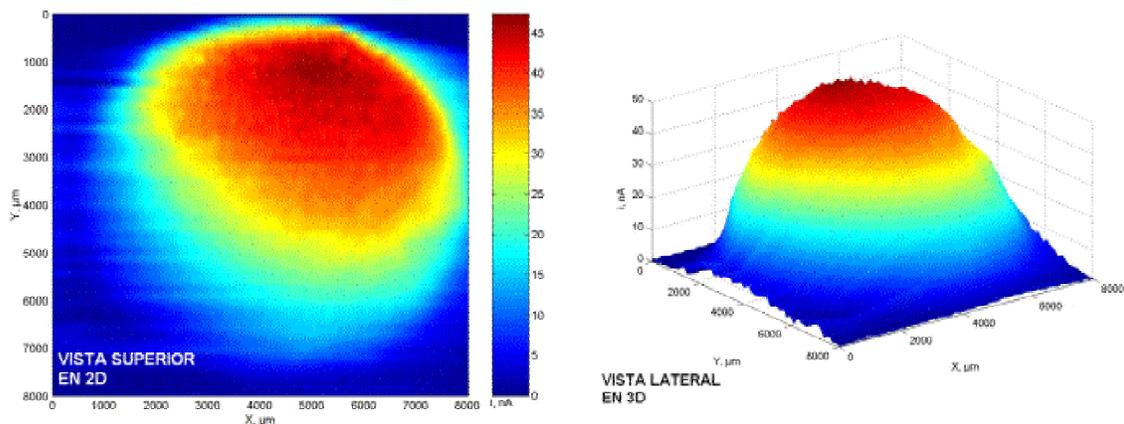


Figura 7. Perfiles de corriente de la actividad electroquímica de la película crecida en presencia de 2ppm de IH en el medio amargo concentrado. Se observa de manera apreciable un desplazamiento del mapeo por efecto convectivo; se aprecia la existencia de un producto de corrosión homogéneo más conductivo que la película blanco.

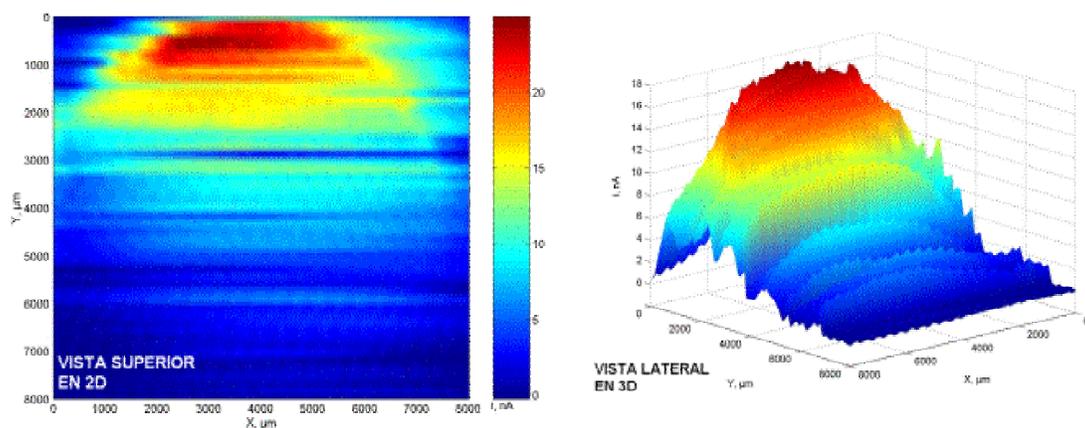


Figura 8.- Perfiles de corriente de la actividad electroquímica de la película crecida en presencia de 4ppm de AE en el medio amargo concentrado. Se observan claramente 2 tipos de películas de productos de corrosión, con diferentes magnitudes de conducción electrónica.

4. CONCLUSIONES

La estrategia utilizada en este trabajo ha permitido el estudio de la inhibición de la corrosión del acero mediante el uso de los agentes químicos IH y AE, en concentraciones similares a las utilizadas en la industria petrolera. Cada agente químico forma productos de corrosión diferentes con distintas propiedades protectoras del acero. En el caso de la IH, el

producto de corrosión formado impide el proceso difusional de H^0 a través de la película; mientras que el AE forma un producto de corrosión eléctricamente más resistivo.

5. AGRADECIMIENTOS

A CONACyT por la beca otorgada para cursar los estudios de doctorado,

6. REFERENCIAS

- Bouckamp B. A., *Users Manual Equivalent Circuit*, ver. 4.51, faculty of chem. Tech., Universidad of Twente, the Netherlands, 1993.
- Cabrera-Sierra R., García I., Sosa E., Oropeza T., González I. (2000) Electrochemical behavior of carbon steel in alkaline sour environments measured by electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochim. Acta*, 46, 487.
- Edwards A., Osborne C., Webster S., Klenerman D., Joseph M., Ostovar P., Doyle M. (1994) Mechanistic studies of the corrosion inhibitor oleic imidazolina. *Corrosion Science*. 36, 315.
- Hernández R., F. (2001) Tesis de Maestría en Ciencias, Diseño y construcción de un microscopio electroquímico y fotoelectroquímico de barrido, Mayo 2001, CUCEI, Universidad de Guadalajara.
- Olsson C-O. A., Agerwal P., Frey M., Landolt D. (2000) An XPS study of the adsorption of organic inhibitors on mild steel surfaces. *Corrosion Science*, 42, 1197.
- Rammelt U., Nguyen P. T., Plieth W. (2003) Corrosion protection by ultrathin films of conducting polymers. *Electrochim. Acta*, 48, 1257.
- Sosa E., Cabrera-Sierra R., García I., Sosa E., Oropeza M. T., González I. (2002), The role of different surface damages in corrosion process in alkaline sour media *Corrosion Science*, 44, 1515.
- Sosa, E. (2002) Tesis de Doctorado en Ciencias, *Caracterización por técnicas Electroquímicas y espectroscópicas de productos de corrosión, formados sobre acero al carbono*. Junio del 2002, UAM-I.

Evaluación de la corrosión del acero de refuerzo en concreto por la técnica de ruido electroquímico

María Carmen Vadillo, Juan Genescá*

Laboratorio Corrosión. Dpto. Ingeniería Metalúrgica. Facultad de Química. UNAM.

Ciudad Universitaria.

genesca@servidor.unam.mx

Jorge Uruchurtu

Centro de Investigaciones en Ingeniería y Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca

RESUMEN

Desde los egipcios hasta la época actual se han ido desarrollando nuevos métodos de construcción basados en el uso del concreto, así como de los elementos que lo constituyen. Los tipos de atmósferas como la rural, urbana, industrial y marina son un factor vital para determinar los procesos de corrosión que afectan a las estructuras de concreto. Un medio ambiente marino se caracteriza principalmente por con grandes concentraciones de iones cloruro, los cuales pueden producir daños de importancia en las obras de infraestructura presentes, como por ejemplo, puentes, llevándose a cabo en este caso el proceso de corrosión de las armaduras metálicas del concreto, debido al rompimiento de la capa pasiva formada en las varillas de acero.

En el presente trabajo se han diseñado y construido seis probetas de concreto semejantes a los pilotes presentes en los puentes, las cuales se han colocado, 3 de ellas en una tina que contiene solamente agua potable y las restantes en una solución de NaCl al 3% en peso, simulando agua de mar, con el objeto de reproducir, en lo posible, las condiciones experimentales prevalecientes en un sistema marino típico y estudiar los efectos de la corrosión en la armadura metálica del concreto mediante la técnica de Ruido Electroquímico.

1. INTRODUCCIÓN

La corrosión del acero de refuerzo en concreto es un proceso electroquímico que involucra una reacción global de corrosión, lo cual es el resultado de dos o más reacciones electroquímicas parciales, que se llevan a cabo en la interfase metal/electrolito.

Las grietas o poros del concreto son un camino para los cloruros en medios marinos. Estos llegan a la superficie del acero destruyendo la capa pasiva de la varilla provocando la formación de macropilas. En las zonas anódicas tiene lugar la siguiente reacción:



Estos electrones se consumen en las zonas catódicas, en las cuales en presencia de oxígeno y agua, se produce la siguiente reacción:



El resultado de las reacciones (1) y (2) da como resultado



la combinación de los iones Fe^{2+} y OH^- producen la formación del $\text{Fe}(\text{OH})_2$ (hidróxido ferroso)

Cabe hacer notar que los iones cloruros están presentes, pero no participan en las reacciones electroquímicas.

El hidróxido ferroso es un compuesto inestable el cual puede reaccionar posteriormente para formar el hidróxido férrico, según la siguiente reacción:



este producto final, conocido como herrumbre, es de color pardo-rojizo.

Los cloruros no se agotan en este proceso y como la concentración del hierro en la superficie es suficiente, la corrosión no se detiene y esto implica el desarrollo de zonas anódicas localizadas a lo largo del acero de refuerzo, creando picaduras profundas, tal como ha sido señalado previamente por ejemplo por Scannell (1996).

El ruido electroquímico consiste en las fluctuaciones espontáneas de potencial y corriente a circuito abierto asociado a los distintos procesos de corrosión a bajas frecuencias (menores a 10 Hz), de baja amplitud, no estacionarios y débilmente estacionarios, transitorios y fenómenos oscilatorios o cíclicos, Malo y Uruchurtu (2001). El ruido electroquímico en potencial es medido y definido como las oscilaciones estocásticas

del potencial electroquímico de un electrodo (trabajo) respecto a un electrodo de referencia o respecto a un electrodo nominalmente “idéntico”. Esta señal puede indicar un cambio en el estado termodinámico de los procesos de corrosión. El ruido electroquímico en corriente es medido y definido como las oscilaciones estocásticas de una corriente electroquímica entre dos electrodos “idénticos”, siendo un indicador del proceso cinético, Malo y Uruchurtu (2001). La medición del ruido en potencial y corriente permite determinar la resistencia de ruido (R_n) a través de la ley de Ohm (ecuación 6) que es semejante a la resistencia a la polarización (R_p), la cual sustituida en la ecuación de Stern-Geary, permitiría calcular la velocidad de corrosión, tal como lo propusieron Chen y Bogaerts (1995).

$$R_n = \frac{\sigma_V}{\sigma_I} \quad (6)$$

donde R_n es la resistencia del ruido electroquímico, σ_V es la desviación estándar del potencial y σ_I es la desviación estándar de la corriente. Estas mediciones se pueden realizar tal como se presenta en la siguiente Figura 1.

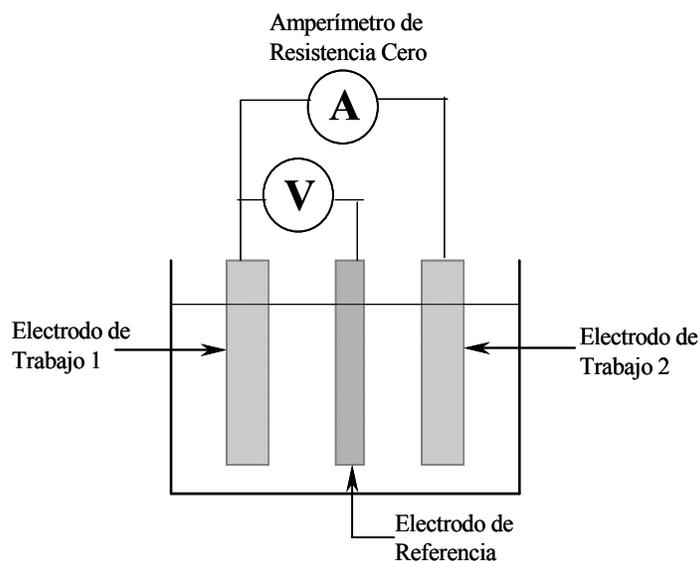


Figura 1. Montaje experimental para la medición de ruido electroquímico

Entre los diferentes métodos para analizar el ruido electroquímico se encuentran los diagramas llamados “series de tiempo”, de los cuales se puede obtener una información simple y directa, debido a que en los mismos se puede lograr la identificación de detalles característicos, como la forma o tipo de corrosión. Otro tipo de análisis del ruido electroquímico es en forma estadística, en la cual los parámetros empleados son la media, la varianza, la desviación estándar, la raíz cuadrada de la media, el sesgo (“skewness”), la

kurtosis y el índice de picado. Este último parámetro, que se define como la relación entre σ_I y I_{RMS} , ayuda a determinar que tipo de corrosión se presenta, Tabla 1. Los valores de este índice se encuentran entre 0 y 1, Eden y Rothwell (1992).

Tabla I - Correlación entre el índice de picado, IP, y el tipo de corrosión esperada, Eden y Rothwell (1992).

Intervalo de IP	Tipo de Corrosión Esperada
$0.001 < PI < 0.01$	Corrosión uniforme
$0.01 < PI < 0.1$	Corrosión mixta
$0.1 < PI < 1.0$	Corrosión localizada

El espectro de frecuencias de una señal específica se denomina dominio de la frecuencia. En este dominio se pueden utilizar tanto el método de la transformada rápida de Fourier (FFT) como el de la máxima entropía (MEM), por sus siglas en inglés. Las pendientes de dichas señales pueden dar una indicación de los mecanismos de corrosión prevalecientes (corrosión localizada vs corrosión general y control difusional vs control activacional) ⁽⁵⁾.

2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

Se construyeron seis probetas cilíndricas de concreto con 7 varillas de acero para cada una, colocadas de manera transversal, a una distancia entre ellas de 10 cm, como se muestra en las Figuras 2 y 3. Las dimensiones de las varillas son de 1.58 cm (5/8 pulgada) de diámetro y 40 cm de longitud. Se utilizó una relación agua/cemento (a/c) de 0.55. El cemento que se utilizó fue de tipo puzolánico Tipo PP 30-R y se decidió no realizar el curado de las probetas para acelerar el proceso de corrosión de las varillas de acero.

Tres probetas fueron contaminadas con cloruros y sumergidas parcialmente en una tina que contenía una solución de NaCl al 3% en peso y las tres probetas restantes fueron elaboradas libres de cloruros y parcialmente sumergidas en otra tina libre de cloruros. Las partes sobresalientes de las varillas fueron recubiertas con una pintura epóxica para analizar sólo la parte de la varilla que se encuentra en contacto con el concreto.

Para realizar las mediciones experimentales se utilizaron tres diferentes arreglos electroquímicos, de los cuales el primero consistió en un electrodo de platino (Pt) como electrodo auxiliar (AE), un electrodo de calomelanos saturado (ECS) como electrodo de referencia (ER) y la varilla de acero como electrodo de trabajo (WE). En este primer arreglo se colocaron los electrodos de Pt y ECS en el electrolito para realizar las mediciones individuales de cada varilla. El segundo arreglo consistió de los mismos electrodos, pero colocándolos sobre el concreto de manera perpendicular a la varilla. En el tercer arreglo se realizó la medición de la varilla 1 con respecto a las demás, es decir, varilla 1 (WE1) vs varilla 2 (WE2), varilla 1 (WE1) vs varilla 3 (WE2), etc., dejando el ECS sobre el electrolito, debido a que la medición se realizó respecto a la primera varilla

(varilla sumergida en el electrolito). Para realizar estas mediciones se utilizó un equipo AUTO DC de Gill Instruments con una velocidad de muestreo de 0.5 s por punto, obteniéndose una lectura total de 2048 puntos.

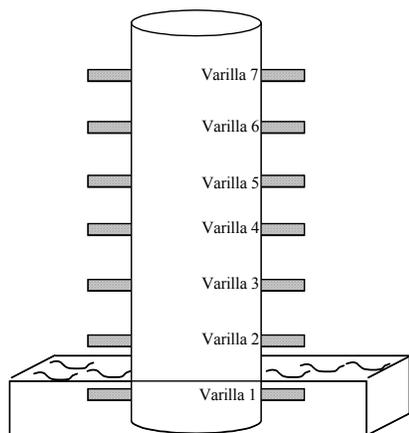


Figura 2. Probetas cilíndricas de acero de refuerzo en concreto.



Figura 3. Diseño real de las probetas de concreto.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSION

En este primer trabajo se presentan únicamente los resultados obtenidos para una probeta colocada en una tina sin cloruros y otra probeta colocada en la solución de NaCl al 3% en peso, mediante los arreglos 1, 2 y 3 antes mencionados.

Tabla II - Resultados estadísticos del arreglo 1 vs ECS- Pt en el electrolito sin cloruros.

Varilla	χ (mV)	χ (mA)	σ_E	σ_I	Irms	IP	R_n (Ω)	V_{corr} (A/cm ²)
1	-496.98	-4.3E-9	2.7E-1	2.64E-8	2.6E-8	0.9868	1.1E+7	2.4E-6
2	-257.95	1.0E-9	7.7E-2	1.79E-8	1.7E-8	0.9984	1.3E+6	6.0E-6
3	-21.81	3.9E-10	7.9E-1	2.63E-8	2.6E-8	0.9998	2.9E+7	8.6E-7
4	-27.62	5.3E-10	2.2E-1	6.07E-9	6.1E-9	0.9961	3.6E+7	7.2E-7
5	-24.08	5.9E-10	2.4E-1	3.78E-9	3.8E-9	0.9877	6.4E+7	4.0E-7
6	-42.98	4.7E-10	4.2E-2	5.3E-10	7.1E-10	0.7475	8.0E+7	3.2E-7
7	-29.95	3.1E-10	6.9E-2	9.7E-9	9.7E-9	0.9994	7.1E+6	3.6E-6

Tabla III - Resultados estadísticos del arreglo 1 vs ECS-Pt en el electrolito con cloruros.

Varilla	χ (mV)	χ (mA)	σ_E	σ_I	Irms	IP	R_n (Ω)	V_{corr} (A/cm ²)
1	-612.22	3.9E-9	5.2E-2	2.1E-9	4.5E-9	0.4739	2.7E+7	9.4E-7
2	-339.91	2.2E-9	3.2E-2	3.6E-9	4.2E-9	0.8526	8.7E+6	2.9E-6
3	-98.00	-1.1E-10	1.5E-2	2.6E-9	2.6E-9	0.9991	5.5E+6	4.7E-6
4	-108.61	8.0E-11	4.9E-2	4.5E-9	4.5E-9	0.9998	1.1E+7	2.4 E-6
5	-89.35	1.3E-10	9.5E-2	3.1E-8	3.1E-8	0.9999	3.1E+6	8.3 E-6
6	-88.73	9.3E-11	4.5E-2	7.2E-9	7.2E-9	0.9999	6.2E+6	4.1 E-6
7	-156.37	2.0E-10	8.5E-2	3.3E-9	3.3E-9	0.9981	2.5E+7	1.0 E-6

Tabla IV - Resultados estadísticos del arreglo 2 vs ECS-Pt en el concreto sin cloruros.

Varilla	χ (mV)	χ (mA)	σ_E	σ_I	Irms	IP	R_n (Ω)	V_{corr} (A/cm ²)
2	-254.41	3.1E-10	7.2E-2	1.4E-9	1.4E-9	0.9766	5.1E+7	5.1E-7
3	121.80	2.3E-10	6.5E+1	5.2E-10	5.7E10	0.9101	1.2E+10	2.1E-9
4	127.20	6.7E-10	3.2E+1	3.0E-9	3.0E-9	0.9760	1.1E+9	2.4E-8
5	93.79	2.1E-10	2.9E+1	5.8E-9	5.8E-9	0.9993	5.1E+8	5.1E-8
6	96.69	4.6E-10	2.0E+1	1.3E-9	1.4E-9	0.9476	1.4E+9	1.7E-8
7	103.63	3.8E-10	1.5E+1	1.3E-8	1.3E-8	0.9995	1.1E+8	2.2E-7

Tabla V - Resultados estadísticos del arreglo 2 vs ECS-Pt en el concreto con cloruros.

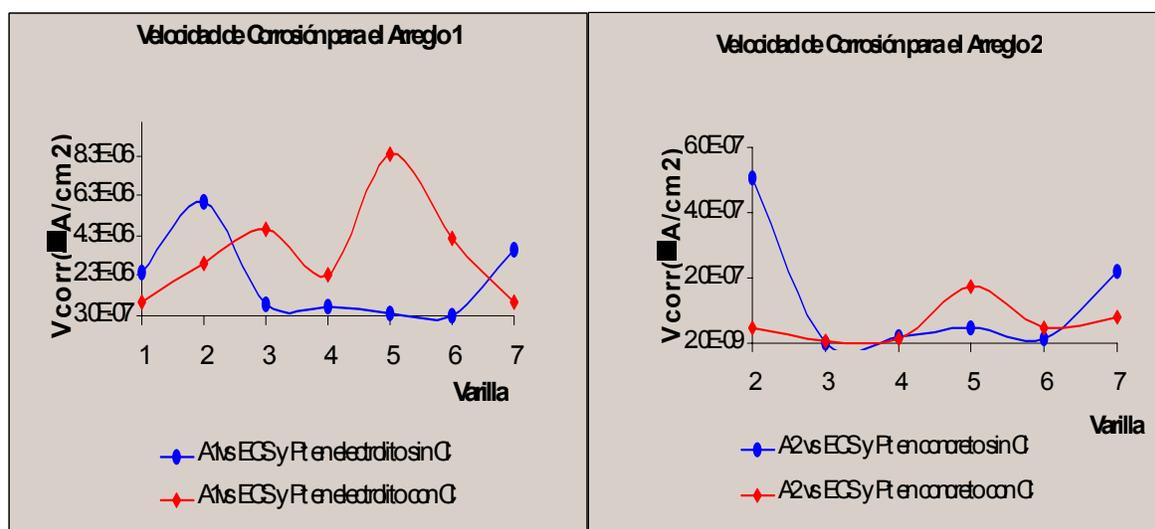
Varilla	χ (mV)	χ (mA)	σ_E	σ_I	Irms	IP	R_n (Ω)	V_{corr} (A/cm ²)
2	-334.53	-2.9E-10	7.7E-1	3.2E-9	3.2E-9	0.9958	5.3E+8	4.8E-8
3	-61.93	-1.1E-9	2.9E+1	1.4E-9	1.8E-9	0.7976	4.8+9	5.4E-9
4	-60.24	3.6E-10	2.3E+1	6.1E-10	7.1E-10	0.8643	1.9E+9	1.3E-8
5	-52.08	-7.0E-10	3.2E+1	1.2E-9	1.3E-9	0.8637	1.4E+8	1.7E-7
6	-51.99	-3.1E-9	5.2E-1	2.1E-8	2.2E-8	0.9899	5.3E+8	4.8E-8
7	-120.27	2.4E-10	3.3E-1	1.0E-9	1.1E-9	0.9734	3.1E+8	8.1E-8

Tabla VI - Resultados estadísticos del arreglo 3 vs WE1-WE2 y ECS en el electrolito sin cloruros.

Varilla	χ (mV)	χ (mA)	σ_E	σ_I	Irms	IP	R_n (Ω)	V_{corr} (A/cm ²)
1-2	-441.85	5.1E-4	3.0E+1	3.1E-5	5.1E-4	0.0617	9.5E+4	2.7E-4
1-3	-447.75	2.2E-4	1.0E+1	1.44E-5	2.1E-4	0.0663	6.9E+4	3.7E-4
1-4	-449.01	1.9E-4	5.5E-1	1.0E-5	1.9E-4	0.1485	7.9E+4	4.9E-4
1-5	-454.78	9.2E-5	1.1E+1	1.3E-5	9.2E-5	0.1485	7.9E+4	3.2E-4
1-6	-457.55	6.1E-5	7.3E-1	6.3E-5	6.1E-5	0.1034	1.1E+5	2.2E-4
1-7	-458.37	8.2E-5	2.6E-1	3.2E-6	8.2E-5	0.0398	8.1E+4	3.2E-4

Tabla VII - Resultados estadísticos del arreglo 3 vs WE1-WE2 y ECS en el electrolito con cloruros.

Varilla	χ (mV)	χ (mA)	σ_E	σ_I	Irms	IP	R_n (Ω)	V_{corr} (A/cm ²)
1-2	-601.06	1.5E-3	2.6E-1	4.9E-5	1.5E-3	0.0319	5.4E+3	4.8E-3
1-3	-608.68	3.8E-3	7.9E-1	2.8E-5	3.8E-4	0.0741	2.8E+4	9.2E-4
1-4	-586.30	3.9E-3	1.8E+1	4.2E-5	3.9E-4	0.1070	4.4E+4	5.9E-4
1-5	-613.12	1.7E-3	2.4E-1	4.7E-6	1.7E-4	0.0275	4.9E+4	5.2E-4
1-6	-614.40	1.3E-3	1.3E-1	1.1E-6	1.3E-4	0.0082	1.2E+5	2.2E-4
1-7	-615.45	9.5E-5	1.2E-1	1.0E-6	9.5E-5	0.0105	1.2E+5	2.2E-4



Figuras 4 y 5. Variación de la velocidad de corrosión para los arreglos 1 y 2.

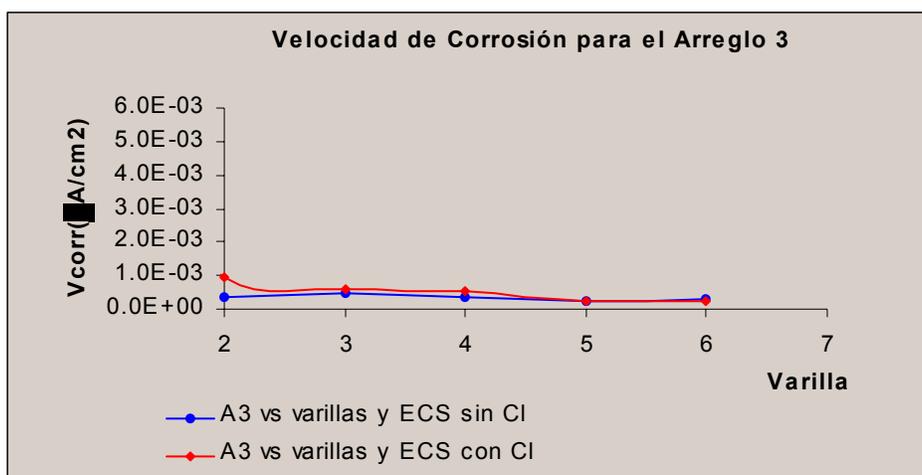


Figura 6. Variación de la velocidad de corrosión para el arreglo 3

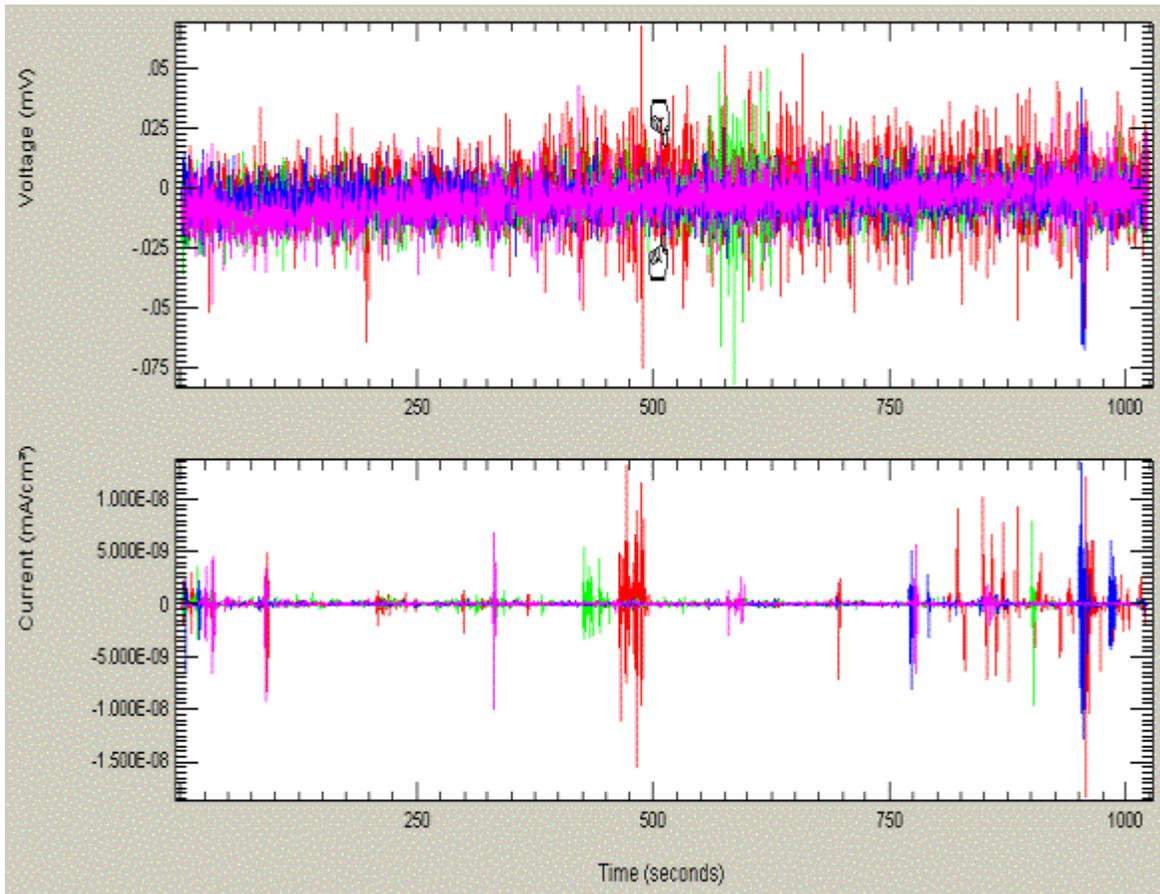


Figura 7. Serie de tiempo para el arreglo 2 vs ECS y Pt sobre el concreto con Cl. Líneas de color rojo corresponde a la varilla 2, la línea verde a la varilla 3, la línea azul a la varilla 4 y la línea lila a la varilla 5.

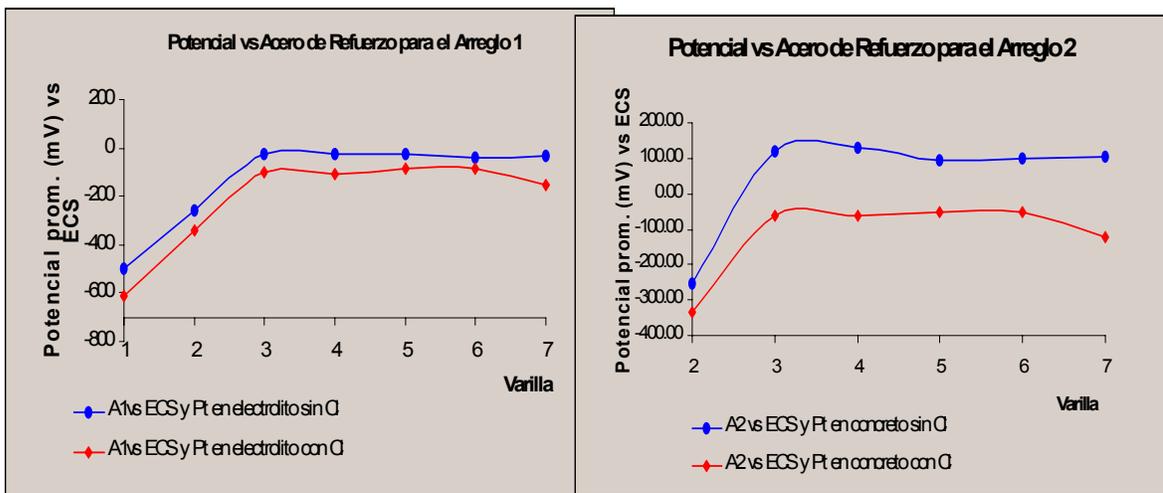


Figura 8. Gráfica de potencial promedio vs. Varilla. Figura 9. Gráfica de potencial promedio vs. Varilla.

varilla para el arreglo 1.

varilla para el arreglo 2.

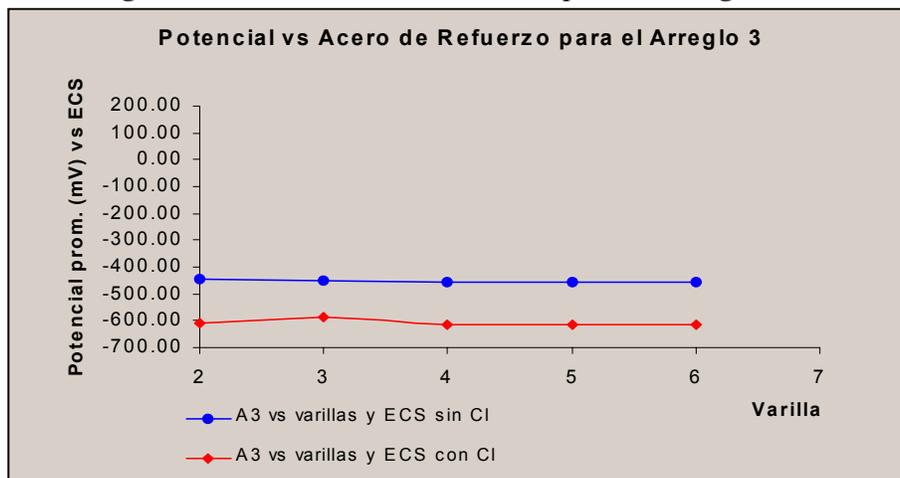


Figura 10. Gráfica de potencial promedio vs. varilla para el arreglo 3.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

En el arreglo electrodo 1, sin cloruros, el valor promedio de los potenciales de corrosión de la varilla 1 (varilla sumergida) tiene un valor de -496.98 mV. Termodinámicamente, este valor se puede interpretar como el inicio de la actividad de corrosión, es decir rompimiento de la capa pasiva y un 90% de probabilidad que se presente corrosión, de acuerdo a la norma ASTM (1991). Para la varilla 2, el promedio del potencial es de -257.95 mV, lo cual corresponde a un comienzo de corrosión incierta según ASTM (1991). En las demás varillas, de manera general, se presentan valores semejantes los cuales oscilan entre -21.81 mV a -29 mV; sólo excepto para la varilla 6 con un valor promedio de -42.98 mV. Esto podría indicar que las varillas embebidas en el concreto y fuera de la solución se encuentran pasivas o que exista una probabilidad baja de corrosión, ASTM (1991). Por el contrario, en el arreglo 1 con cloruros, para la varilla 1 (varilla sumergida), el valor promedio del potencial de corrosión es de -612.22 mV, indicando actividad corrosiva; es decir, que la capa pasiva se está rompiendo, de acuerdo a los valores de potencial señalados en la norma ASTM (1991). De manera semejante al arreglo 1 sin cloruros, en la varilla 2, el valor promedio del potencial de corrosión es de -339.91 mV que indica una actividad corrosiva un poco mayor, con una diferencia de -82 mV que la anterior, ASTM (1991). Para las varillas 3, 4, 5, 6 y 7 los valores promedio de potencial de corrosión se encuentran en un intervalo comprendido entre -88 mV a -156 mV, indicando que se encuentran un poco más activas que en el arreglo anterior y mostrando una corrosión no activa, ASTM (1991). Estos comportamientos se pueden observar en la Figura 8.

En el arreglo 2 sin cloruros, el valor promedio de los potenciales de corrosión para la varilla 2 es de -254.41 mV, el cual es bastante semejante al obtenido en el arreglo 1 sin cloruros, diferido tan sólo por -0.003 mV, presentándose el mismo comportamiento de una probabilidad de una corrosión incierta de acuerdo a ASTM (1991). En el caso de las varillas

3, 4, 5, 6 y 7, éstas presentan valores promedio de potencial de corrosión menos activas, pudiéndose establecer que existe poca probabilidad de corrosión, debido a que la medición se realizó de manera directa sobre el concreto tal como ha sido propuesto por Tronconis y col. (1998). Con este mismo arreglo electrodico 2, pero con cloruros, los valores promedio de potencial de corrosión para la varilla 2 son de -334.53 mV, muy parecidos al arreglo 2 sin cloruros y que indican la presencia de una actividad de corrosión. Y en el caso de las varillas 3, 4, 5, 6 y 7 sus valores promedio de potencial de corrosión están comprendidos en un intervalo de potencial entre -51.99 mV a -120 mV, indicando que se encuentran menos activas en el arreglo 1 con cloruros y este rango corresponde con un 90% de probabilidad de que no se presente corrosión, observando la tendencia en la Figura 9.

Analizando la gráfica de la Figura 4 de la velocidad de corrosión para el arreglo 1 sin cloruros, las varillas 1, 2, y 7 tienen valores de velocidad de corrosión altos, de acuerdo con Tronconis y col. (1998). Para las demás varillas, estos son casi despreciables. En el arreglo 1 con cloruros todas las varillas presentan un nivel de corrosión elevado, excepto la varilla 1 en el que su nivel es despreciable. En el arreglo 2 sin cloruros las velocidades de corrosión por las varillas 2 y 7 presentan niveles de corrosión muy elevada, para las varillas 3, 4, 5 y 6 su velocidad es despreciable. En el mismo arreglo 2 con cloruros, las velocidades de corrosión en todas las varillas son despreciables; esto no era esperado, debido a que se encuentran en un sistema más agresivo, donde los cloruros atacan al acero de refuerzo rompiendo la capa pasiva y favoreciendo por tanto la corrosión. De manera estadística, la técnica de ruido electroquímico proporciona datos tanto de los potenciales de corrosión como del índice de localización que permiten una estimación del verdadero estado de la varilla. Este comportamiento se puede observar en la Figura 7 donde en corriente se pueden observar los efectos localizados en el transcurso del tiempo, aún y cuando los valores de la velocidad de corrosión demuestren lo contrario.

Haciendo referencia al índice de picado, IP, Tabla I, para los arreglos 1, sin y con cloruros y 2, sin y con cloruros, de una manera comparativa con cloruros y sin cloruros, las varillas presentan indicios de corrosión localizada; es decir, que se está rompiendo y reestableciendo la capa pasiva del acero de refuerzo en una determinada área de la misma.

En el arreglo 3 sin cloruros, los valores promedio del potencial de corrosión, de manera general, se puede observar que son semejantes entre ellos. Para el arreglo 3 con cloruros de igual manera todas las varillas tienen valores promedio de potenciales de corrosión semejantes entre sí. Las tendencias entre estos arreglos pueden comprobarse en la Figura 10.

Los valores de la velocidad de corrosión para el arreglo 3, sin y con cloruros, se pueden observar en la Figura 6, comprobándose que la tendencia es bastante semejante a la obtenida con los potenciales de corrosión. Esto pondría de manifiesto que las velocidades de corrosión son despreciables, Tronconis y col. (1998), para este arreglo y que no son comparativas con respecto a los anteriores arreglos 1 y 2, sin y con cloruros.

En el índice de localización de la Tabla I para el arreglo 3 sin cloruros, los pares de varillas 1-2, 1-3 y 1-7 presentan valores que corresponden a una corrosión de tipo mixto y para los pares 1-4, 1-5 y 1-6, presentan valores que corresponden en cambio a un tipo de corrosión localizada. En el arreglo 3 con cloruros, los pares 1-2, 1-3, 1-4, 1-5 y 1-7 presentan valores característicos de una forma de corrosión mixta, excepto para el par 1-6.

5. CONCLUSIONES

La técnica de ruido electroquímico ha demostrado ser una herramienta útil para determinar los diferentes tipos de corrosión que se pueden presentar en las varillas de acero de refuerzo, mediante la determinación del parámetro Índice de Localización, para los 3 arreglos electródicos experimentales propuestos.

Los valores promedio del potencial de corrosión dan información termodinámica y permiten establecer un criterio aproximado sobre el estado del acero de refuerzo para los 3 arreglos.

Mediante la técnica de ruido electroquímico se puede calcular la velocidad de corrosión y con ello establecer de una manera cinética el estado real del acero de refuerzo. Esto se observó más para el arreglo 2 con cloruros, donde los valores de velocidad de corrosión son menores a los esperados de los demás arreglos. Esto puede indicar que la misma técnica es bastante sensible para predecir que está ocurriendo en el sistema.

6. REFERENCIAS

- ASTM C876-91 (1991), *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*, ASTM International, Filadelfia.
- Chen J., Bogaerts W. (1995), *Corros. Sci.* 1839- 1845.
- Eden D., Rothwell A. (1992), *CORROSION/92* Paper # 223, NACE, Houston, USA.
- Malo J.M. y Uruchurtu J. (2001) *Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión: La técnica de Ruido Electroquímico para el estudio de la corrosión*. UNAM, México D.F., pp 93-105.
- Scannell W.T. (1996) *Assesment of Physical Condition of Concrete Bridge Components*. Corr. Inc., pp. 9-13.
- Tronconis O., Romero A., Andrade C., Helene P, Díaz, I (1998) *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*, 2a. Edición, CYTED, Madrid, pp. 12-13.

CONCLUSIONES.

La educación es sin duda un elemento fundamental para el desarrollo de toda sociedad, un canal fundamental que permite el encuentro con mejores condiciones de vida. Es por ello que hoy más que nunca la educación debe estar íntimamente ligada con los diferentes avances tecnológicos que se presentan y encaminada a que cada estudiante sea un ser competitivo, crítico y productivo a través de nuevas y mejores técnicas de enseñanza.

Desde esta postura y habiendo tomado en cuenta aspectos didácticos y pedagógicos, los estándares de educación a distancia y de acuerdo a las normas requeridas para su incorporación en el Campus Virtual, fue posible desarrollar un paquete didáctico útil para la asignatura de Corrosión y Degradación de la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de Materiales, del Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.

La virtualización de la asignatura de Corrosión y Degradación (digitalización de la materia) a las nuevas tecnologías en el aula presenta un cambio en la metodología a seguir para obtener el máximo rendimiento en el proceso Enseñanza Aprendizaje. Los beneficios que ofrecen las nuevas tecnologías permitirá mejorar el aprendizaje, al aumentar la retención del estudiante y al hacer que los procesos de estudio le resulten más provechosos. Por otro lado, permitirán estimular la participación dentro de la clase al tener un conocimientos previos de la unidad didáctica en estudio, tendrá más tiempo para reflexionar y analizar lo que va a preguntar, opinar, refutar o compartir en clase. El alumno podrá consultar el material tantas veces sea necesario vía Internet a través de la página de la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo en su liga con el Campus Virtual de esta institución

Este material didáctico de la asignatura de Corrosión y Degradación no pretende ser un modelo rígido más a seguir, el propósito de esta material didáctico es apoyar a la cátedra a través de la información recopilada las de distintas fuentes bibliográficas (Contenidos del programa de la asignatura), las actividades de aprendizaje (Preliminares, de Estudio e Integradoras) creadas en cada unidad didáctica y de utilización de las nuevas tecnologías de la información y comunicación (entorno virtual).

Este material didáctico cubre el programa de la asignatura de Corrosión y Degradación, que la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo autoriza al Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, para la Licenciatura en Ingeniería en Ciencia de los Materiales, contando con Información del curso, Planeación de contenidos, Guías de estudio, Contenido didáctico, Mapas Conceptuales, Presentaciones y material auxiliar todos ellos realizados para cada unidad. Dicho paquete esta basado en las nuevas tecnologías de la información y podrá ser actualizado, rediseñado y/o enriquecido cuantas veces sea necesario para mejorar el proceso de Enseñanza-Aprendizaje que se lleva a cabo en el modelo educativo de la UAEH.

El conocimiento que adquirirá el alumno con el material didáctico le proporcionara en su ámbito profesional las habilidades que le permitan ser analítico, crítico y creativo para identificar y seleccionar un material adecuado que elimine o disminuya el proceso de corrosión bajo condiciones de trabajo en un ambiente determinado. Los conceptos y conocimientos de las diferentes formas de corrosión y degradación de un material le permitirán prolongar su vida útil y conservar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

La realización de este tipo de trabajos de titulación, contrario a lo pensado, no es nada sencillo ya que obliga al tesista a estudiar y abordar temas tanto del área de estudio como de aspectos didácticos, tomar cursos extra sin los cuales no se podría haber desarrollado el presente material. Sin duda también es fundamental la experiencia y las aportaciones del director de tesis, miembros de la academia, sinodales y personal del Campus Virtual.

BIBLIOGRAFIA GENERAL.

- [1] Fontana M.G., & Greene N. D. *Corrosion Engineering*. New York, USA: McGraw-Hill Book Company.
- [2] Sastri V. S. (1998). *Corrosion inhibitors principles and applications*. West Sussex, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [3] Oropeza G. M. T., & Ponce de León A.C.A., González M.I. (2000). *Principios y aplicaciones de los procesos electroquímicos*. México D.F.: Impresiones y diseño de la UAM-I.
- [4] Javier Ávila M, & Joan Genescá. (1996). *Más allá de la Herrumbre. México*. Fondo de cultura económica, Colección: L Ciencia desde México, num. 9
- [5] Memorias de XIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (2004). San Luis Potosí, S.L.P, México: Sociedad Mexicana de Electroquímica.
- [6] Proyecto D.328 (2001). *Estudio y desarrollo de inhibidores de corrosión usando simulación molecular y técnicas Electroquímicas*. México D.F. De La Coordinación de Simulación Molecular del IMP.
- [7] Mariaca R. L. Genescá L. J., Uruchutu C. J., Salvador Hdez, L., Veleza L., Maldonado L.,(1999). *Corrosividad Atmosférica*. México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- [8] Argaez V.E. (1972). *Corrosión*. Tula de Allende, Hidalgo, México: Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos.
- [9] Casillas N.S. (2001). *Curso –Taller Corrosión y su control*. Guadalajara, Jalisco, México: Universidad de Guadalajara.
- [10] Walsh F. (2000). *Un primer curso de Ingeniería química*. Alicante, España: Imprenta Gamma.
- [11] Ringbom (1963). *Complexation in Analytical Chemistry* Wiley-Interscience. New York.
- [12] Rojas, G. Trejo and M. T. Ramírez (1993). *Diagramas de Zonas de Predominio Aplicados al Análisis Químico*. México D. F. Ed. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
- [13] Rojas, M. T. Ramírez, J. G. Ibáñez and I. González (1991). *Construction of Multicomponent Pourbaix Diagrams Using Generalized Species*. J. Electrochem. Soc. 138, 366.
- [14] Veloz (2003). *Mecanismo de corrosión de aceros al carbón en una solución Amortiguada de ácido acético, cloruros y H₂S. Modificación por la presencia de inhibidores de corrosión*. México D. F. UAM-I.

- [15] Manual de Procedimientos de la Gerencia de Protección Ecológica e Industrial (1978). México D.F.: Pemex Refinación.
- [16] Ringbom (1963). *Complexation in Analytical Chemistry Wiley-Interscience. New York.*
- [17] S. Caroli and V. K. Sharma (1978). *Tables of Standard Electrode Potentials.* New York, Ed. John Wiley and Sons.
- [18] V. Reyes, Tesis de Doctorado en Ciencias (2002). Recuperación Selectiva de "DORÉ" (Au-Ag) de Disoluciones Provenientes de la Lixiviación de Minerales, Utilizando Un reactor Electroquímico FM01-LC. México D. F. UAM-I.
- [19] Y. Zhang, Z. Fang and M. Muhammed (1997). On the solution chemistry of cyanidation of gold and silver bearing sulphide ores. A critical evaluation of thermodynamic calculations. *Hydrometallurgy* 46, 251.
- [20] Bloom, B., 1971, *Taxonomía de los objetivos de la educación*, Buenos Aires: El Ateneo.
- [21] Carriedo López, N. Y Alonso Tapia, J., 1994, *¿Cómo enseñar a comprender un texto?* Madrid. Ediciones Universidad Autónoma de Madrid. Cuaderno ICE.
- [22] Cooper, J. David., 1986, *Improving reading comprehension.* Boston. Houghton Mifflin Company. (Capítulos 3 y 8).
- [23] Elaboración de guías didácticas para la enseñanza a distancia. UNED. Instituto Universitario de Educación a Distancia. Unidad Técnica de Investigación y Formación en Materiales Didácticos.
- [24] Hernández, M. *Taller de Diseño de cursos en línea.* Pachuca, Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Campus Virtual.
- [25] Gutiérrez, F., Jiménez, H., Hernández, M. *Taller de Diseño de Materiales para elearning. Unidad 2 Unidades Didácticas.* Pachuca, Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Campus Virtual.
- [26] Gutiérrez, F., Jiménez, H., Hernández, M. *Taller de Diseño de Materiales para elearning. Unidad 7 Mapa Conceptual como recurso didáctico.* Pachuca, Hidalgo: Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Campus Virtual.
- [27] Novak, D. Gowin, B (1988). *Aprendiendo a aprender.* Barcelona: Martínez Roca. [Libro básico de la formación teórico práctica del docente para el diseño y aplicación de mapas conceptuales]