



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES

ARAGÓN

“PROTECCIÓN CATÓDICA EN PLATAFORMAS  
MARINAS TIPO FIJAS”

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL  
PRESENTA:  
*HORACIO HUMBERTO JURADO PACHECO*

ASESOR: ING. JOSÉ MARIO ÁVALOS HERNÁNDEZ



FES Aragón

MÉXICO, D.F. AGOSTO

2005

m 346746



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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

**AGRADECIMIENTOS:**

A Dios, por darme la dicha de la vida y la familia a la que llegue; por brindarme salud, amor y conocimiento para afrontar los sucesos que se presentan cada día.

A mi Madre, que gracias a su esfuerzo, valor y ejemplo he logrado ser una persona digna. Te doy gracias por la paciencia que has tenido conmigo, por tu amor que día a día crece hacia mi hermano y a mí; y por que eres el claro ejemplo de que todo se puede lograr cuando uno se lo propone; Te amo y siempre voy a estar agradecido contigo y se que con nada lograre pagarte lo que hiciste y lo que sigues haciendo por nosotros.

Estoy orgulloso de ti y si volviera a nacer no dudaría ni un solo momento de volver a ser tu hijo.

A mi Familia que día a día se preocupan y se ocupan de nosotros y que están en todo momento en las buenas y en las malas pese a las dificultades que se les presentan; hago mención de los miembros mas allegados para mí : Mis abuelos a pesar de la distancia siempre están conmigo, a mi hermano que gracias a el he conocido la paciencia, a mi tío Jesús y tía Esther y sus maravillosos hijos, que dos de ellos siguen viviendo en mi memoria y en mi corazón, a mis tíos Juan y Lita y a sus excelentes hijos Juan Manuel, Mariana y Diana que muy pronto conocerán la dicha que hoy vivo.

Al Ing. Silverio Caltenco V. que mas que un amigo es un miembro mas de la familia, gracias a su apoyo a mí y a mi familia, he logrado concluir mis estudios, agradezco tu apoyo para realizar esta tesis, te doy gracias por todo espero ser una persona que te llene de orgullos.

Al Ing. José Mario Avalos Hernández que me ha apoyado como asesor a la realización de esta Tesis, aportando su conocimiento y alta experiencia.

A mis Amigos de Escuela y de la vida, que han compartido conmigo triunfos y fracasos y gracias a su apoyo hemos logrado conservar una amistad fructífera, deseo que sigamos siendo muy buenos amigos como hasta ahora, confío en que sus sueños y metas se cumplirán; entre los mas allegados menciono, Francisco Acevedo A., Oscar Sánchez G., Ricardo Padierna V., Jonathan Olmos A. y Michel Ramírez O.

A los Ingenieros José Sabino Varela A., Maria de los Ángeles Sánchez C., Gabriel Guzmán G. así como a Karina Morales V., por su apoyo y amistad, ellos han contribuido a que mis metas se hagan realidad, espero seguir encontrándome a gente tan amable y capaz como ellos.

Por último y no menos importante agradezco el apoyo de la Familia Zúñiga Aldana por abrirme las puertas de su hogar, con ellos he compartido muchos momentos inolvidables, los quiero y agradezco su cariño y confianza cuando mas lo he necesitado; le doy gracias a Dios por cruzar nuestros caminos; de igual forma deseo ser una persona que los llene lo logros y orgullos. En especial te agradezco a ti Miriam Y. Zúñiga A. amiga y compañera; tu constante apoyo a lo largo del tiempo que tenemos de conocernos.

Has dado felicidad y alegría a mi vida  
Tenerte a mi lado me llena de orgullo  
Tu ayuda y comprensión han hecho realidad todos mis sueños  
Y no hay duda que cada día te necesito y te amo más  
Eres la persona que hace nacer lo mejor que hay en mí.

You're my angel  
But our love  
Is like the wind  
I can't see it.  
But I cant feel it





UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

“PROTECCIÓN CATÓDICA EN PLATAFORMAS MARINAS TIPO FIJAS”

### TEMARIO

PRESENTACIÓN	1
INTRODUCCIÓN	2
CAP.I ANTECEDENTES	6
I.1 IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN EN LA PRODUCCIÓN Y EN EL DESARROLLO ECONÓMICO Y SOCIAL	6
CAP.II LOS METALES EN LA INDUSTRIA PETROLERA	10
II.1 ORIGEN DEL PETRÓLEO	10
II.2 LA EXTRACCIÓN	12
II.3 PERFORACIÓN DE LOS POZOS	13
II.4 REFINACIÓN DEL PETRÓLEO	14
II.5 PLANTAS PETROQUÍMICAS	16
II.6 DERIVADOS Y USOS DEL PETRÓLEO	17
II.7 TRANSPORTE DEL PETRÓLEO	18
CAP.III ¿QUÉ ES CORROSIÓN?	20
III.1.1 ¿POR QUE EXISTE LA CORROSIÓN?	21
III.1.2 LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA	23
III.1.3 LAS MANIFESTACIONES DE LA CORROSIÓN	25
III.2 FORMAS DE CORROSIÓN	30
III.2.1 CORROSIÓN GALVÁNICA Y UNIFORME	31
III.2.2 CORROSIÓN POR EROSIÓN	31
III.2.3 CORROSIÓN POR AGRIETAMIENTO	32
III.2.4 CORROSIÓN POR PICADURA	33
III.2.5 CORROSIÓN POR EXFOLIACIÓN Y DISOLUCIÓN SELECTIVA	34
III.2.6 CORROSIÓN INTERGRANULAR O INTERCRISTALINA	34
III.2.7 CORROSIÓN DE FRACTURA POR TENSIÓN	35
III.2.8 QUÍMICA Y ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSIÓN	36
III.2.9 CORROSIÓN EN ÁCIDOS	37
III.2.10 CORROSIÓN EN SOLUCIONES NEUTRAS Y ALCALINAS	37
III.2.11 CORROSIÓN EN OTROS SISTEMAS	38





<b>III.3 MEDICIÓN DE LA CORROSIÓN</b>	39
III.3.1 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN	39
III.3.2 MEDIDA DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	40
<b>CAP.IV PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN</b>	43
IV.1 RECUBRIMIENTOS PROTECTORES	44
IV.2 PROTECCIÓN CATÓDICA	48
IV.3 LOS INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN	52
<b>CAP.V PROTECCIÓN CATÓDICA</b>	59
V.1.1 INTRODUCCIÓN	59
V.1.2 PROTECCIÓN CATÓDICA	60
V.1.3 FUNDAMENTO DE LA PROTECCIÓN CATÓDICA	60
V.1.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA PROTECCIÓN CATÓDICA EN TUBERÍA ENTERRADAS	61
<b>V.2 SISTEMAS PARA PROTECCIÓN CATÓDICA</b>	63
V.2.1 ÁNODO GALVÁNICO	63
V.2.2 CARACTERÍSTICAS DE UN ANODO DE SACRIFICIO	63
V.2.3 TIPOS DE ÁNODOS	63
V.2.4 RELLENO BACKFILL	64
V.2.5 DISEÑO DE INSTALACIÓN PARA ANODO GALVÁNICO	64
V.2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANODOS GALVÁNICOS	65
V.2.7 CORRIENTE IMPRESA	65
V.2.8 ÁNODOS UTILIZADOS EN LA CORRIENTE IMPRESA	66
V.2.9 FUENTE DE CORRIENTE	67
V.2.10 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS	68
V.2.11 MEDIAS CELDAS DE REFERENCIA	69
V.2.12 CRITERIOS DE PROTECCIÓN	70
V.2.13 RESISTIVIDAD DEL SUELO	70
V.2.14 CORROSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO	71
<b>VI PLATAFORMAS MARÍTIMAS</b>	73
VI.1 UNA CIUDAD EN MEDIO DEL MAR	73
VI.2 TIPOS DE PLATAFORMAS	74
VI.3 PROTECCIÓN CATÓDICA DE ESTRUCTURAS SUMERGIDAS	77
VI.4 LIMPIEZA EXTERNA DE TUBERÍA CON CHORRO DE ARENA Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS	85
<b>CONCLUSIONES</b>	115
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	116





## PRESENTACIÓN

Más allá de la herrumbre representa un loable empeño en el esfuerzo de acercar la ciencia de la corrosión al gran público.

En este trabajo se plantea la necesidad de modificar y adaptar el complicado lenguaje científico con el fin de ampliar el alcance de la obra. No resulta difícil para aquellos que poseen conocimientos de química —y de otras ciencias naturales— reconocer el aspecto central de esta ciencia, que desempeña el papel de crear e interconectar el conocimiento de la naturaleza con las transformaciones de la materia útiles para el hombre.

En efecto, desde que el hombre descubrió cómo obtener metales a partir de los minerales, puso marcha atrás al proceso natural que los llevó, combinados con otros elementos, a formar parte de diversas formaciones geológicas. Algo "tenía que pagar" la especie humana por el "atrevimiento" de ir en contra del proceso espontáneo de degradación metálica, imposible de detener en una biosfera que contiene tanto oxígeno, agua y sales.

Esta obra es una recopilación de los estudios de los más reconocidos expertos nacionales en el tema. Quienes en su compromiso con su campo de estudio no se ha restringido a sus investigaciones en la Facultad de Química de la UNAM o a impartir cursos en maestría y doctorado. Preocupados por la importancia del estudio de la corrosión, participan activamente en servicios, asesorías y encuestas con los industriales y, ahora, inciden en la divulgación de este tema singularmente importante.

Vale la pena subrayar, finalmente, otro aspecto principal del trabajo: la "magia" económica de la química: la industria metalúrgica resulta altamente costosa en energía, así que el estudio de la corrosión ha permitido al hombre ahorrar enormes cantidades de dinero y otros recursos. Nuestro bienestar depende, en mucho, de los materiales que usamos para vestirnos, construir y proteger estructuras, viviendas y transportes, para conservar y empacar alimentos y producir los incontables bienes que abundan en los comercios.

Al final de esta Tesis, el lector empezará a reconocer el papel central de la química en la preservación de los objetos metálicos, la recuperación de nuestros minerales, el desarrollo de materiales sustitutos y la búsqueda de fuentes de energía. Habrá tomado conciencia del fenómeno de la corrosión, de sus efectos y de cómo la ciencia y la tecnología química contribuyen a su control y remedio.

El estudio de la corrosión no debe estar restringido a los ingenieros químicos, todo ingeniero debe tener en cuenta este proceso natural para elegir los materiales que usara en cada proyecto que desarrolle, sobre todo en estructuras, para conservar sus características mecánicas.





## INTRODUCCIÓN

La palabra corrosión evoca en muchas personas la imagen tan conocida de la "herrumbre", propia de los metales ferrosos, como si sólo el hierro fuera susceptible de presentar este fenómeno.

En realidad, la corrosión es la causa general de la alteración y destrucción de la mayor parte de los materiales naturales o fabricados por el hombre. Si bien esta fuerza destructiva ha existido siempre, no se le ha prestado atención hasta los tiempos modernos, como efecto de los avances de la civilización en general y de la técnica en particular. El desarrollo de los métodos de extracción y uso de los combustibles, muy especialmente del petróleo, así como la expansión de la industria química, han modificado la composición de la atmósfera de los centros industriales y de las aglomeraciones urbanas.

La producción de acero y la mejora de sus propiedades mecánicas han hecho posible su empleo en los dominios más variados. Desgraciadamente, el desarrollo en la utilización de los productos siderúrgicos va acompañado, paralelamente, de un aumento en el tributo que cada año se paga a la corrosión. Para tener una pequeña idea de lo que esto pueda suponer, sépase que aproximadamente un 25% de la producción anual de acero es destruida por la corrosión.

La corrosión de los metales constituye por lo tanto el despilfarro más grande en que incurre la civilización moderna. Las roturas en los tubos de escape y silenciadores de los automóviles, la sustitución de los calentadores de agua domésticos, explosiones por fugas de gas en los tanques de almacenamiento o tuberías de conducción, roturas en las conducciones de agua, incluso el derrumbe de un puente, son algunos de los problemas con los cuales se encuentra el hombre. Nada metálico parece ser inmune a este tipo de acontecimientos.

A veces los daños causados por un problema de corrosión pueden ser muy amplios. Pensemos en la reparación de la falla de un oleoducto de crudo, resultante de problemas de corrosión interna o externa. Aparte del costo inherente a la sustitución del tramo de tubería dañado, hay que tener en cuenta el daño causado por el aceite derramado al terreno, muchas veces irreversible, así como el posible paro de la refinería y los consiguientes problemas de desabastecimiento que ello puede llegar a acarrear. Y sin embargo, un proceso esencialmente de corrosión lo utilizamos diariamente para producir energía eléctrica: la pila seca.

Veamos, con un poco más de detalle, algunos ejemplos de corrosión que ocurren con cierta frecuencia en la vida diaria.

### LAS TUBERÍAS DE AGUA

La corrosión forma parte del diario que hacer. Desgraciadamente, no sufrimos sus efectos hasta que estos se hacen visibles.

Un ejemplo común lo constituye la rotura de una tubería de agua. Inicialmente, al abrir el grifo, el agua, en vez de presentar su claridad habitual tiene una cierta tonalidad o coloración castaña. Al probarla, nos parece percibir un sabor que nos recuerda bastante al de las sales de hierro. Ha empezado a atacarse el material base de la tubería galvanizada: el acero de la red de distribución de agua potable.





La continuación puede ser una historia conocida para muchos. Al cabo de poco tiempo, al abrir el grifo del agua caliente del lavabo, especialmente al aumentar la salida del agua, empieza a salir ésta turbia y rojiza, con gran cantidad de partículas en suspensión. Algunas de éstas parecen ser de arcilla que estarían sedimentadas sobre la pared de las tuberías de conducción y distribución y que se han incorporado al agua al pasar ésta a régimen turbulento. Otras partículas tienen un aspecto gelatinoso y una coloración pardo rojiza (característica del hidróxido férrico). A continuación hacemos la misma comprobación con el grifo del agua fría. El agua sale limpia, incolora. Sólo cuando el régimen de circulación es claramente turbulento se observa una cierta turbiedad y algunas partículas en suspensión que parecen provenir del sedimento que pudiera existir ya en el interior de la tubería de conducción de agua. Aquellas partículas rojizas, gelatinosas, no se observan en esta ocasión.

La aparición de humedades y goteras es una consecuencia que no se deja esperar. Al inspeccionar con más detalle la zona en que ha aparecido la gotera, podemos tener la sorpresa de que la aparición de la humedad, que creíamos debida a la perforación de la tubería por el lado del agua, ya que el agua rojiza que salía por el grifo desde tiempo atrás así lo hacía presagiar, ha tenido lugar en cambio en la parte exterior. Retirado el tubo que presentaba la perforación, pudimos observar en él que el ataque perforante provenía del exterior.

En este caso, el responsable de la avería no era el agua transportada, sino el material de construcción que se hallaba en estrecho contacto con el exterior del tubo. Un análisis más cuidadoso nos permite observar claramente que la zona afectada coincidía con la existencia de "restos" de yeso que sin duda pusieron los albañiles en la etapa de fijación de los tubos.

El yeso tiene la particularidad de que además de ser corrosivo por sí mismo frente al hierro y acero galvanizado, entre otros materiales metálicos, es higroscópico, por lo cual tiene tendencia a captar y retener la humedad y con ello proseguir la corrosión hasta sus últimas consecuencias.

## EL AUTOMÓVIL

Empiezan apareciendo manchitas y picaduras minúsculas en los parachoques, que si bien no afectan su resistencia mecánica, sí deslucen su presentación. Posteriormente, se pueden localizar puntos aislados de ataque en las partes cubiertas por molduras que iban fijadas en agujeros de la carrocería; cada vez que lavamos el coche observamos la afluencia de herrumbre que sale de debajo de tales molduras

Bajo las alfombrillas han aparecido picaduras perforantes y lo que es peor, el sonido emitido al percudir es análogo al de una hojalata llena de herrumbre. Problemas similares han aparecido en los guardabarros, especialmente en las zonas más escondidas, donde se había acumulado barro. Del mismo modo hemos detectado una fuente corrosión en los alvéolos de los faros delanteros que sufren la influencia desfavorable de las salpicaduras de lodo de los vehículos que nos preceden en la época de lluvias.

Este efecto de agentes corrosivos sobre la carrocería se agrava en las zonas costeras, por la influencia de la brisa marina que llega a poner en contacto con la carrocería gotitas cargadas de cloruro de sodio (sal).





Asimismo, es pernicioso la acción de la sal común que se echa en invierno sobre las calzadas heladas, en muchos países con inviernos largos y duros, con el fin de que puedan transitar los vehículos por ellas.

La corrosión sufrida por la carrocería aumenta con el grado de humedad y con la temperatura, todo ello acrecentado por el contenido de gases sulfurosos en la atmósfera. Por ello, no es raro ver en ciudades costeras e industriales una verdadera legión de auténtica chatarra rodante.

## CONSTRUCCIONES DE CONCRETO

Un buen observador puede haber notado, especialmente en las grandes ciudades o en las zonas costeras, la aparición de manchas de herrumbre en las estructuras de concreto, por ejemplo, en un estacionamiento subterráneo, un puente o en los postes de las líneas de distribución de corriente eléctrica.

Estas estructuras están reforzadas interiormente con varillas de acero, las cuales se cubren de concreto (mezcla de cemento Portland, arena, agua y agregado de pH alto, aproximadamente 12) con el objeto de proporcionar una adecuada resistencia mecánica a la estructura. En condiciones normales, o sea en un medio con atmósfera limpia, no debe ocurrir nada que afecte a la estructura, ya que el concreto es un medio perfectamente compatible con el acero, precisamente por el alto valor del pH.

El concreto es un material discontinuo, duro y de alta densidad. Debido a su propia constitución, contiene una gran cantidad de poros, los cuales pueden estar interconectados, siendo por tanto permeable a líquidos y gases. Esto es de una gran importancia para el proceso de corrosión del acero de refuerzo, pues tanto el oxígeno como el agua pueden difundirse hacia el acero a través de la masa de concreto. Por ejemplo, cuando la estructura de concreto está en contacto frecuente con agua que contenga iones de cloruro (agua de mar), a través de la propia porosidad del concreto puede llegar a las varillas de acero. En este momento se inicia la corrosión del acero. La herrumbre que se va formando como resultado del proceso de corrosión en el acero, por una parte disminuye la sección original de la varilla, y por otra, hace perder la adherencia inicial y deseada entre el acero y el concreto. El óxido de hierro formado (herrumbre) ocupa un volumen aproximadamente cuatro veces mayor que el acero sin corroer. A medida que se va formando herrumbre por la corrosión del acero, ésta ejerce una gran presión sobre el concreto que lo rodea. Las fuerzas son de tal magnitud dentro del concreto que provocan grietas que lo fragilizan, perdiendo éste sus buenas propiedades mecánicas. El proceso continúa hasta que la herrumbre llega a aparecer en la superficie del concreto y se pueden observar las estructuras "manchadas".

La presencia de herrumbre en una determinada estructura es por tanto evidencia de que el proceso de corrosión de la varilla de acero de refuerzo está muy avanzado y de que la seguridad de la estructura, por ejemplo en el caso de un puente, deja mucho que desear.

El efecto producido por los cloruros (agua de mar) en un medio ambiente marino, es sustituido por el dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso ( $\text{SO}_2$ ), proveniente de industrias que queman gasóleo, escapes de los autos, etc., en el caso de las grandes ciudades, produciendo las mismas consecuencias.





Hasta aquí hemos visto y analizado una serie de problemas de corrosión, más o menos comunes en la vida diaria y que se presentan con cierta frecuencia. Existen, sin embargo, como ya se dijo, muchos otros tipos y formas de corrosión que afectan a la industria y el transporte, y que son muy específicos de cada actividad. Los más peligrosos son aquellos que tienen lugar sin un aviso previo, sin presentar manifestaciones externas visibles como la presencia de la herrumbre. Por lo general, están relacionados con el empleo de metales y aleaciones especiales. El metal falla, sin más, poniendo en peligro muchas veces vidas humanas.

En la actualidad, los problemas derivados de la presencia simultánea de un medio agresivo y un esfuerzo mecánico (corrosión bajo tensión, corrosión-fatiga), o de la corrosión muy localizada (corrosión por picaduras) son demasiado frecuentes. Algunas veces se producen en aleaciones que fueron específicamente diseñadas para resistir en un determinado medio. Los problemas de corrosión tienen mucho que ver con el grado de avance tecnológico y, desgraciadamente, muchas veces no se conocen las verdaderas limitaciones de un material, hasta que este falla.





## I ANTECEDENTES

### I.1 IMPORTANCIA DE LA CORROSIÓN EN LA PRODUCCIÓN Y EN EL DESARROLLO ECONÓMICO Y SOCIAL

Un estudio reciente efectuado por el National Bureau of Standards de los Estados Unidos (*Efectos económicos de la corrosión metálica en los Estados Unidos*, Departamento de Comercio, 1979) señala que tomando como base el año 1975, los costos totales de la corrosión metálica pueden estimarse del orden de los 70 billones de dólares, lo cual supone un 4.2% del Producto Nacional Bruto (PNB). El estudio señala que aproximadamente un 15%, o sea 10.5 billones de dólares (0.6% del PNB) pudiera haberse evitado. En un país de un nivel de desarrollo tecnológico más parecido a México, como Egipto, se ha realizado un estudio similar. Durante una investigación en la que se invirtió un periodo de 3 años, se evaluaron los efectos económicos provocados por la corrosión de los materiales metálicos, los cuales se estimaron en aproximadamente 475 millones de dólares, un 4.9% del PNB de Egipto.

Los estudios de que disponemos hasta la fecha han sido realizados entre 1949 y 1979 y provienen básicamente de 9 países. Los resultados globales están reproducidos en la siguiente tabla, con la indicación del costo total de la corrosión expresado en dólares americanos del valor del año de estudio. Asimismo y en aquellos casos en que ha sido posible, se expresa el porcentaje del Producto Nacional Bruto para el año en que se realizó el estudio.

COSTO DE LA CORROSIÓN POR AÑO			
AÑO	PAÍS	EN MILLONES DE DÓLARES EUA	EN % DEL PIB
1949	EUA	5 500	
1960-61	India	320	
1964	Suecia	58 a 77	
1965	Finlandia	47 a 62	0.58 a 0.77
1968-69	RFA	6 000	3.0
1969	URSS	6 700	2.0
1969	Gran Bretaña	3 200	3.5
1973	Australia	550	1.5 a 3.0
1974	URSS	18 850	4.1
1975	EUA	70 000	4.2
1976 — 77	Japón	9 200	1.8

Para varios de los países de que se dispone de datos, el costo de la corrosión representa aproximadamente entre un 2 y un 4% del PNB. No existen muchos datos sobre cómo se reparten estos costos. El estudio realizado en la Gran Bretaña, conocido como informe Hoar, precisa que para este país los costos debidos a la corrosión soportados por algunos sectores industriales, se pueden desglosar aproximadamente así: transportes (26%), naval (21%), la industria de la construcción (18%), el petróleo y la química (13%), etc. Muchos de los estudios efectuados han señalado que entre un 20 y un 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. Mas allá de la frialdad de los números y de los porcentajes del Producto Nacional Bruto, los problemas derivados de la corrosión se dejan sentir en tres vertientes:





- 1) económica (pérdidas directas e indirectas);
- 2) conservación de recursos (agotamiento de las reservas naturales);
- 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.)

La pérdida de vidas humanas es, desgraciadamente, una posibilidad que se puede presentar como una consecuencia directa o indirecta de la corrosión. ¿De qué datos se dispone en México para realizar un estudio semejante al efectuado en otros países sobre los costos de la corrosión? No se dispone a la fecha de un estudio, siquiera aproximado, de lo que pueden suponer las pérdidas debidas a la corrosión.

Una encuesta realizada muy recientemente sobre los problemas que plantea la corrosión a la Industria Química Mexicana (*Ciencia y Desarrollo* núm. 64 p. 103, septiembre-octubre 1985) ha señalado la incidencia del fenómeno en más de un 90% de las empresas que contestaron la encuesta. Ello habla por sí mismo de la gravedad del problema, y seguramente a nivel nacional, englobando a todos los sectores productivos, representa una cantidad más que respetable de dinero. No obstante, no son tanto los indicadores económicos lo preocupante, sino la incidencia que la corrosión tiene en la seguridad humana. El costo social de la corrosión puede llegar a ser tan elevado, que debería prestársele una mayor atención por el lado de las autoridades, empezando por la propia toma de conciencia personal. Lo "normal" desgraciadamente entre los utilizadores de metales en su mayor o menor grado de ignorancia acerca del cómo y cuándo puede ocurrir la corrosión y el modo de prevenirla o evitarla.

A la corrosión, en los apretados programas de las carreras técnicas, si acaso, se le reserva el papel de una materia optativa, muchas veces para cubrir unos créditos sobrantes al finalizar los estudios de ingeniería. La preparación de los profesionales que tienen que ver con la utilización de materiales metálicos, redundaría en una acertada utilización de los recursos anticorrosivos de que se dispone a la fecha y con ello se conseguiría un considerable ahorro en la monstruosa cifra que anualmente representan las pérdidas originadas por la corrosión.

En estos días de recortes presupuestales, de ahorro de energía y de conservación de los recursos naturales, parece increíble que no se haga aún nada al respecto.

En esta tesis se intentará explicar las causas que generan la corrosión, los distintos tipos y características de la corrosión y los diferentes métodos que existen para prevenir y controlar este problema y así de esta forma explicar por que la protección catódica es uno de los métodos más utilizados y recomendados para prevenir y corregir este problema; y ver como funciona en la solución a la corrosión en plataformas petroleras, por mencionar uno de tantos problemas que existen en cualquier parte del mundo.

También se pretende interconectar el conocimiento de la naturaleza con las transformaciones de los materiales útiles para el hombre.





En ella se plantea la necesidad de modificar y adaptar el complicado lenguaje científico con el fin de hacer más fácil de entender la importancia del estudio de la corrosión casi imposible de detener en una biosfera que contiene tanto oxígeno, agua y sales.

El estado de existencia más estable para un metal es su forma combinada, o dicho desde un punto de vista termodinámico, es el estado de más baja energía, ya sea en forma de óxido, sulfuro, cloruro, sulfatos o carbonatos. En realidad lo que se hace para extraer el metal es ir en contra de una reacción que ocurre espontáneamente en la naturaleza.

Es interesante el pensar que un pedazo de metal puede permanecer estable por un período indefinido, si es que se le mantiene en el vacío, es decir, en donde el metal no entre en contacto con ningún medio o sustancia, incluyendo al aire por supuesto. Parece ser que la gran mayoría de los metales adquieren esa estabilidad tan deseada sólo cuando se les aísla del ambiente terrestre. Si este aislamiento no ocurre, los metales pueden reaccionar con el medio ambiente y formar compuestos tal y como lo mencionamos anteriormente. Estos compuestos permanecen sobre la superficie del metal y son por lo general frágiles, de mal aspecto y fácilmente desprendibles, por ejemplo los óxidos del hierro, lo que origina una transformación continua del metal al repetirse periódicamente el proceso de oxidación. Sin embargo, esta forma de degradación metálica no es la única. Existen muy diversas formas por las cuales un metal o aleación deja de ser útil a consecuencia de su inestabilidad frente al medio. El metal bien puede disolverse lentamente y llegar a transformarse totalmente en otra especie (corrosión uniforme).

Asimismo, los metales, bajo ciertas condiciones, pueden formar grietas y romperse catastrófica y súbitamente al estar sujetos simultáneamente a un medio agresivo y a un esfuerzo mecánico moderado (corrosión bajo tensión). También pueden ser atacados muy localizadamente en forma de pequeños agujeros profundos que avanzan rápidamente, llegando a perforar gruesas secciones de estructuras metálicas, haciendo a éstas deficientes en sus propiedades mecánicas e inutilizándolas por completo (corrosión por picaduras). Los metales también pueden sufrir de fatiga con la consecuente pérdida de resistencia cuando son sometidos a esfuerzos periódicos (corrosión, fatiga) o fragilizarse súbitamente y ser inoperativos (fragilidad por hidrógeno). Es entonces precisamente cuando todos los conocimientos que se tienen de la lucha contra la corrosión deben de ser aplicados para que un metal o aleación perdure más años en servicio, sin transformarse rápidamente en formas combinadas (óxidos, sulfuros, etc.) o en sistemas degradados localizadamente que no cumplan con los requisitos exigidos a los metales o aleaciones originales, tales como resistencia, dureza, lustre, apariencia, etc.

Para tal fin se emplean diversas técnicas de protección tales como la alteración superficial de los metales, consistente en crear o provocar una barrera protectora producto del mismo metal. En este proceso el metal puesto a proteger se oxida electrolíticamente, es decir, se le somete a condiciones tales que produce una película superficial de óxido del mismo metal, óxido que por lo general es de apariencia agradable, transparente, duro y muy protector; ejemplo, el aluminio anodizado.





Asimismo, un metal dado puede combinarse o alearse con otros metales, no tanto con el fin de conseguir una alteración benéfica en sus propiedades mecánicas, sino para mejorar su resistencia a algún tipo de corrosión. Un ejemplo típico lo constituye el acero inoxidable, en donde el hierro se combina con elementos tales como el cromo, níquel, molibdeno, etc, los cuales incrementan notablemente la resistencia de esa aleación a degradarse químicamente.

También se puede aislar físicamente al metal del medio en que se encuentra expuesto. Esto se efectúa por medio de recubrimientos aislantes como las pinturas anticorrosivas. La mayoría de estas pinturas contienen, aparte de los elementos de una pintura convencional, sustancias que inhiben activamente el deterioro de un metal por corrosión, en caso de que la pintura presente algún defecto tal como porosidad, fractura, etc.

Debido a que los procesos de corrosión son en esencia electroquímicos, es decir, transformaciones químicas que se llevan a cabo en presencia de diferencias de potencial eléctrico (tema que trataremos con más detalle en los capítulos siguientes), también se puede alterar la velocidad de corrosión de un metal al modificar las diferencias de potencial eléctrico existentes. A las técnicas que tratan acerca de este sistema de protección metálica se las conoce como protección catódica y anódica. Por último, al proceso de aplicar ciertas sustancias orgánicas e inorgánicas a la superficie del metal, que adhiriéndose a ella aminoran la velocidad con que el metal se transforma a un compuesto poco servible, se le conoce como inhibición de la corrosión.

Me permito hacer énfasis en que la estabilidad de los metales está determinada por lo que sucede en la interfase entre el metal y el medio agresivo y que, en muchos casos, la resistencia interna de un metal está influenciada a largo plazo por los sucesos que suceden en esta interfase. La mayor parte de las degradaciones que un metal o aleación sufren en su apariencia o en su resistencia mecánica comienza en las moléculas que están en contacto directo con el medio ambiente.





## II LOS METALES EN LA INDUSTRIA PETROLERA

En la industria petrolera se usan gran cantidad de estructuras metálicas sometidas a medio ambiente agresivo, tuberías y recipientes de proceso y almacenamiento que contienen sustancias que degradan internamente el metal con que fueron construidos además del medio ambiente que actúa sobre la superficie exterior.

Del petróleo se dice que es el energético más importante en la historia de la humanidad; un recurso natural no renovable que aporta el mayor porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo, por eso es de vital importancia en la vida económica de los países, el hombre ha desarrollado diferentes técnicas para la explotación de los yacimientos de hidrocarburos y de aplicarlos como energéticos, o bien para transformarlos por medio de la industria petroquímica. Ya que resulta muy importante para el desarrollo socio-económico de los países.

### II.1 ORIGEN DEL PETRÓLEO

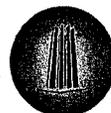
El petróleo es una sustancia aceitosa de color oscuro a la que, por sus compuestos de hidrógeno y carbono, se le denomina hidrocarburo.

La composición elemental del petróleo normalmente está comprendida dentro de los siguientes intervalos:

ELEMENTO	PESO
CARBÓN	84 - 87
HIDRÓGENO	11 - 14
AZUFRE	0 - 2
NITRÓGENO	0.2

Ese hidrocarburo puede estar en estado líquido o en estado gaseoso. En el primer caso es un aceite al que también se le dice crudo. En el segundo se le conoce como gas natural.

Según la teoría más aceptada, el origen del petróleo y del gas natural- es de tipo orgánico y sedimentario.





Esa teoría enseña que el petróleo es el resultado de un complejo proceso físico-químico en el interior de la tierra, en el que, debido a la presión y las altas temperaturas, se produce la descomposición de enormes cantidades de materia orgánica que se convierten en aceite y gas.

Esa materia orgánica está compuesta fundamentalmente por el fitoplancton y el zooplancton marinos, al igual que por materia vegetal y animal, todo lo cual se depositó en el pasado en el fondo de los grandes lagos y en el lecho de los mares.

Junto a esa materia orgánica se depositaron mantos sucesivos de arenas, arcillas, limo y otros sedimentos que arrastran los ríos y el viento, todo lo cual conformó lo que geológicamente se conoce como rocas o mantos sedimentarios, es decir, formaciones hechas de sedimentos.

Entre esos mantos sedimentarios es donde se llevó a cabo el fenómeno natural que dio lugar a la creación del petróleo y el gas natural.

Ese proceso de sedimentación y transformación es algo que ocurrió a lo largo de millones de años. Entre los geólogos hay quienes ubican el inicio de todo ese proceso por la época de los dinosaurios y los cataclismos. Otros opinan que hoy se está formando de una manera similar el petróleo del mañana.

En un comienzo los mantos sedimentarios se depositaron en sentido horizontal. Pero los movimientos y cambios violentos que han sacudido a la corteza terrestre variaron su conformación y, por consiguiente, los sitios donde se encuentra el petróleo.

Es por esto que la geología identifica hoy varios tipos de estructuras subterráneas donde se pueden encontrar yacimientos de petróleo: anticlinales, fallas, domos salinos, etc.

En todo caso, el petróleo se encuentra ocupando los espacios de las rocas porosas, principalmente de rocas como areniscas y calizas. Es algo así como el agua que empapa una esponja. En ningún caso hay lagos de petróleo. Por consiguiente, no es cierto que cuando se extrae el petróleo quedan enormes espacios vacíos en el interior de la tierra.

Si tomamos el ejemplo de la esponja, cuando ésta se exprime vuelve a su contextura inicial. En el caso del petróleo, los poros que se van desocupando son llenados de inmediato por el mismo petróleo que no alcanza a extraerse y por agua subterránea.

Los orígenes del gas natural son los mismos del petróleo, pues, como se dijo antes, el gas es petróleo en estado gaseoso.

Cuando se encuentra un yacimiento que produce petróleo y gas, a ese gas se le llama "gas asociado". Pero también hay yacimientos que sólo tienen gas, caso en el cual se le llama "gas libre".

Otros yacimientos sólo contienen petróleo líquido en condiciones variables de presión y transferencia. Generalmente el petróleo líquido se encuentra acompañado de gas y agua.





## II.2 LA EXTRACCIÓN

La extracción, producción o explotación del petróleo se hace de acuerdo con las características propias de cada yacimiento.

Para poner un pozo a producir se baja una especie de cañón y se perfora la tubería de revestimiento a la altura de las formaciones donde se encuentra el yacimiento.

El petróleo fluye por esos orificios hacia el pozo y se extrae mediante una tubería de menor diámetro, conocida como "tubing" o "tubería de producción".

Si el yacimiento tiene energía propia, generada por la presión subterránea y por los elementos que acompañan al petróleo (por ejemplo gas y agua), éste saldrá por sí solo. En este caso se instala en la cabeza del pozo un equipo llamado "árbol de navidad", que consta de un conjunto de válvulas para regular el paso del petróleo.

Si no existe esa presión, se emplean otros métodos de extracción. El más común ha sido el "balancín" o "machín", el cual, mediante un permanente balanceo, acciona una bomba en el fondo del pozo que succiona el petróleo hacia la superficie.

El petróleo extraído generalmente viene acompañado de sedimentos, agua y gas natural, por lo que deben construirse previamente las facilidades de producción, separación y almacenamiento.

Una vez separado de esos elementos, el petróleo se envía a los tanques de almacenamiento y a los oleoductos que lo transportarán hacia las refinerías o hacia los puertos de exportación.

El gas natural asociado que acompaña al petróleo se envía a plantas de tratamiento para aprovecharlo en el mismo campo y/o despacharlo como "gas seco" hacia los centros de consumo a través de gasoductos.

En el caso de yacimientos que contienen únicamente gas natural, se instalan los equipos requeridos para tratarlo (proceso de secado, mantenimiento de una presión alta) y enviarlo a los centros de consumo.

A pesar de los avances alcanzados en las técnicas de producción, nunca se logra sacar todo el petróleo que se encuentra (in situ) en un yacimiento. En el mejor de los casos se extrae el 50 ó 60 por ciento.

Por tal razón, existen métodos de "recobro mejorado" para lograr la mayor extracción posible de petróleo en pozos sin presión natural o en declinación, tales como la inyección de gas, de agua o de vapor a través del mismo pozo productor o por intermedio de pozos inyectores paralelos a éste.





### II.3 PERFORACIÓN DE LOS POZOS

La única manera de saber realmente si hay petróleo en el sitio donde la investigación geológica propone que se podría localizar un depósito de hidrocarburos, es mediante la perforación de un hueco o pozo.

En Colombia la profundidad de un pozo puede estar normalmente entre 2.000 y 25.000 pies, dependiendo de la región y de la profundidad a la cual se encuentre la estructura geológica o formación seleccionada con posibilidades de contener petróleo.

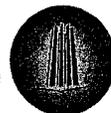
El primer pozo que se perfora en un área geológicamente inexplorada se denomina "pozo exploratorio".

De acuerdo con la profundidad proyectada del pozo, las formaciones que se van a atravesar y las condiciones propias del subsuelo, se selecciona el equipo de perforación más indicado.

Los principales elementos que conforman un equipo de perforación, y sus funciones, son los siguientes:

- ◆ **Torre de perforación o taladro** - Es una estructura metálica en la que se concentra prácticamente todo el trabajo de perforación.
- ◆ **Tubería o "sarta" de perforación** - Son los tubos de acero que se van uniendo a medida que avanza la perforación.
- ◆ **Brocas** - Son las que perforan el subsuelo y permiten la apertura del pozo.
- ◆ **Malacate** - Es la unidad que enrolla y desenrolla el cable de acero con el cual se baja y se levanta la "sarta" de perforación y soporta el peso de la misma.
- ◆ **Sistema de lodos** - Es el que prepara, almacena, bombea, inyecta y circula permanentemente un lodo de perforación que cumple varios objetivos: lubrica la broca, sostiene las paredes del pozo y saca a la superficie el material sólido que se va perforando.
- ◆ **Sistema de cementación** - Es el que prepara e inyecta un cemento especial con el cual se pegan a las paredes del pozo tubos de acero que componen el revestimiento del mismo.
- ◆ **Motores** - Es el conjunto de unidades que imprimen la fuerza motriz que requiere todo el proceso de perforación.

El tiempo de perforación de un pozo dependerá de la profundidad programada y las condiciones geológicas del subsuelo. En promedio se estima entre dos a seis meses.





La perforación se realiza por etapas, de tal manera que el tamaño del pozo en la parte superior es ancho y en las partes inferiores cada vez más angosto. Esto le da consistencia y evita derrumbes, para lo cual se van utilizando brocas y tubería de menor tamaño en cada sección.

#### II.4 REFINACIÓN DEL PETRÓLEO

El petróleo finalmente llega a las refinerías en su estado natural para su procesamiento. Aquí prácticamente lo que se hace es cocinarlo. Por tal razón es que al petróleo también se le denomina "crudo".

Una refinería es un enorme complejo donde ese petróleo crudo se somete en primer lugar a un proceso de destilación o separación física y luego a procesos químicos que permiten extraerle buena parte de la gran variedad de componentes que contiene.

El petróleo tiene una gran variedad de compuestos, al punto que de él se pueden obtener por encima de los 2.000 productos.

El petróleo se puede igualmente clasificar en cuatro categorías: parafínico, nafténico, asfáltico o mixto y aromático.

Los productos que se sacan del proceso de refinación se llaman derivados y los hay de dos tipos: los combustibles, como la gasolina, ACPM, etc.; y los petroquímicos, tales como polietileno, benceno, etc.

Las refinerías son muy distintas unas de otras, según las tecnologías y los esquemas de proceso que se utilicen, así como su capacidad.

Las hay para procesar petróleos suaves, petróleos pesados o mezclas de ambos. Por consiguiente, los productos que se obtienen varían de una a otra.

La refinación se cumple en varias etapas. Es por esto que una refinería tiene numerosas torres, unidades, equipos y tuberías. Es algo así como una ciudad de plantas de proceso.

En términos sencillos, el funcionamiento de una refinería de este tipo se cumple de la siguiente manera:

El primer paso de la refinación del petróleo crudo se cumple en las torres de "destilación primaria" o "destilación atmosférica".

En su interior, estas torres operan a una presión cercana a la atmosférica y están divididas en numerosos compartimientos a los que se denominan "bandejas" o "platos". Cada bandeja tiene una temperatura diferente y cumple la función de fraccionar los componentes del petróleo.

El crudo llega a estas torres después de pasar por un horno, donde se "cocina" a temperaturas de hasta 400 grados centígrados que lo convierten en vapor.





Esos vapores entran por la parte inferior de la torre de destilación y ascienden por entre las bandejas. A medida que suben pierden calor y se enfrían.

Cuando cada componente vaporizado encuentra su propia temperatura, se condensa y se deposita en su respectiva bandeja, a la cual están conectados ductos por los que se recogen las distintas corrientes que se separaron en esta etapa.

Al fondo de la torre cae el "crudo reducido", es decir, aquel que no alcanzó a evaporarse en esta primera etapa.

Se cumple así el primer paso de la refinación. De abajo hacia arriba se han obtenido, en su orden: gasóleos, acpm, queroseno, turbosina, nafta y gases ricos en butano y propano. Algunos de estos, como la turbosina, queroseno y acpm, son productos ya finales.

Las demás corrientes se envían a otras torres y unidades para someterlas a nuevos procesos, al final de los cuales se obtendrán los demás derivados del petróleo.

Así, por ejemplo, la torre de "destilación al vacío" recibe el crudo reducido de la primera etapa y saca gasóleos pesados, bases parafínicas y residuos.

La Unidad de Craqueo Catalítico o Cracking recibe gasóleos y crudos reducidos para producir fundamentalmente gasolina y gas propano.

Las unidades de Recuperación de Vapores reciben los gases ricos de las demás plantas y sacan gas combustible, gas propano, propileno y butanos.

La planta de mezclas es en últimas la que recibe las distintas corrientes de naftas para obtener la gasolina motor, Premium y Magna sin.

La unidad de aromáticos produce a partir de la nafta: tolueno, xilenos, benceno, ciclohexano y otros petroquímicos.

La de Parafinas recibe destilados parafínicos y nafténicos para sacar parafinas y bases lubricantes.

De todo este proceso también se obtienen azufre y combustóleo. El combustóleo es lo último que sale del petróleo. Es algo así como el fondo del barril.

En resumen, el principal producto que sale de la refinación del petróleo es la gasolina motor. El volumen de gasolina que cada refinería obtiene es el resultado del esquema que utilice. En promedio, por cada barril de petróleo que entra a una refinería se obtiene 40 y 50 por ciento de gasolina.

El gas natural rico en gases petroquímicos también se puede procesar en las refinerías para obtener diversos productos de uso en la industria petroquímica.





## II.5 PLANTAS PETROQUÍMICAS

Del petróleo se obtienen determinados compuestos que son la base de diversas cadenas productivas que determinan en un amplia gama de productos denominados petroquímicos que se utilizan en las industrias de fertilizantes, plásticos, alimenticia, farmacéutica, química y textil entre otras. Las principales cadenas petroquímicas son las del gas natural, las olefinas (etileno, propileno y butenos) y la de los aromáticos.

A partir del gas natural se produce el gas de síntesis que permite la producción a gran escala de hidrogeno, haciendo posible la producción posterior de amoniaco por su reacción con nitrógeno, y de metanol, materia prima en la producción de metil-terbutil-éter, entre otros compuestos.

Del etileno se producen un gran número de derivados, como las diferentes clases de polietileno, cloruro de vinilo, compuestos clorados, óxidos de etileno, monómeros de estireno entre otros que tienen aplicación en plásticos, recubrimientos, moldes, etc.

Del propileno se producen compuestos como alcohol isopropílico, polipropileno y acrilonitrilo, que tienen gran aplicación en la industria de solventes, pinturas y fibras sintéticas.

Por deshidrogenación de butenos, o como subproducto del proceso de fabricación de etileno se obtiene el 1.3-butadieno que es una materia prima fundamental en la industria de los elastómeros, para la fabricación de llantas, sellos, etc.

Una cadena fundamental en la industria petroquímica se basa en los aromáticos (benceno, tolueno y xilenos). El benceno es la base de producción de ciclohexano y de la industria del nylon; así como del cumeno para la producción industrial de acetona y fenol. Los xilenos son el inicio de diversas cadenas petroquímicas, principalmente las de las fibras sintéticas

En las refinerías, en los centros de procesamiento de gas y en los complejos petroquímicos se cuenta con instalaciones para generar los servicios auxiliares que requieren los procesos.

Generalmente se cuenta con sistemas de acondicionamiento de agua, calderas de generación de vapor de alta presión, turbogeneradores de vapor o de gas, torres de enfriamiento y si es necesario, sistemas de enfriamiento a base de refrigerantes. En lo posible se mantiene cierta integración de procesos de generación de servicios, de manera que la eficiencia global sea la más adecuada, pero manteniendo siempre la confiabilidad y flexibilidad requerida por el sistema.





## II.6 DERIVADOS Y USOS DEL PETRÓLEO

Los siguientes son los diferentes productos derivados del petróleo y su utilización:

- ◆ **Gasolina motor corriente y extra** : Para consumo en los vehículos automotores de combustión interna, entre otros usos.
- ◆ **Turbocombustible o turbosina** : Gasolina para aviones jet, también conocida como Jet-A.
- ◆ **Gasolina de aviación** : Para uso en aviones con motores de combustión interna.
- ◆ **ACPM o Diesel** : De uso común en camiones y buses.
- ◆ **Queroseno** : Se utiliza en estufas domésticas y en equipos industriales. Es el que comúnmente se llama "petróleo".
- ◆ **Cocinol** : Especie de gasolina para consumos domésticos. Su producción es mínima.
- ◆ **Gas propano o GLP** : Se utiliza como combustible doméstico e industrial.
- ◆ **Bencina industrial** : Se usa como materia prima para la fabricación de disolventes alifáticos o como combustible doméstico
- ◆ **Combustóleo o Fuel Oil** : Es un combustible pesado para hornos y calderas industriales.
- ◆ **Disolventes alifáticos** : Sirven para la extracción de aceites, pinturas, pegantes y adhesivos; para la producción de thinner, gas para quemadores industriales, elaboración de tintas, formulación y fabricación de productos agrícolas, de caucho, ceras y betunes, y para limpieza en general.
- ◆ **Asfaltos** : Se utilizan para la producción de asfalto y como material sellante en la industria de la construcción.
- ◆ **Bases lubricantes** : Es la materia prima para la producción de los aceites lubricantes.
- ◆ **Ceras parafínicas** : Es la materia prima para la producción de velas y similares, ceras para pisos, fósforos, papel parafinado, vaselinas, etc.
- ◆ **Polietileno** : Materia prima para la industria del plástico en general
- ◆ **Alquitrán aromático (Arotar)** : Materia prima para la elaboración de negro de humo que, a su vez, se usa en la industria de llantas. También es un diluyente
- ◆ **Acido nafténico** : Sirve para preparar sales metálicas tales como naftenatos de calcio, cobre, zinc, plomo, cobalto, etc., que se aplican en la industria de pinturas, resinas, poliéster, detergentes, tensoactivos y fungicidas





- ◆ **Benceno** : Sirve para fabricar ciclohexano.
- ◆ **Ciclohexano** : Es la materia prima para producir caprolactama y ácido adípico con destino al nylon.
- ◆ **Tolueno** : Se usa como disolvente en la fabricación de pinturas, resinas, adhesivos, pegantes, thinner y tintas, y como materia prima del benceno.
- ◆ **Xilenos mezclados** : Se utilizan en la industria de pinturas, de insecticidas y de thinner.
- ◆ **Ortoxileno** : Es la materia prima para la producción de anhídrido ftálico.
- ◆ **Alquilbenceno** : Se usa en la industria de todo tipo de detergentes, para elaborar plaguicidas, ácidos sulfónicos y en la industria de curtientes.

El azufre que sale de las refinerías sirve para la vulcanización del caucho, fabricación de algunos tipos de acero y preparación de ácido sulfúrico, entre otros usos. En Colombia, de otro lado, se extrae un petróleo pesado que se llama Crudo Castilla, el cual se utiliza para la producción de asfaltos y/o para mejoramiento directo de carreteras, así como para consumos en hornos y calderas.

El **gas natural** sirve como combustible para usos doméstico, industriales y para la generación de energía termoeléctrica.

En el área industrial es la materia prima para el sector de la petroquímica. A partir del gas natural se obtiene, por ejemplo, el polietileno, que es la materia prima de los plásticos.

Del gas natural también se puede sacar gas propano. Esto es posible cuando el gas natural es rico en componentes como propanos y butanos, corrientes líquidas que se le separan.

## II.7 TRANSPORTE DEL PETRÓLEO

En el mundo del petróleo los oleoductos y los buques tanqueros son los medios por excelencia para el transporte del crudo.

El paso inmediato al descubrimiento y explotación de un yacimiento es su traslado hacia los centros de refinación o a los puertos de embarque con destino a la exportación

Para ello se construye un oleoducto, trabajo que consiste en unir tubos de acero a lo largo de un trayecto determinado, desde el campo productor hasta el punto de refinación y/o de embarque.

La capacidad de transporte de los oleoductos varía y depende del tamaño de la tubería. Es decir, entre más grande sea el diámetro, mayor la capacidad. Hay oleoductos desde 6 hasta 36 pulgadas de diámetro.





Estas líneas de acero pueden ir sobre la superficie o bajo tierra y atraviesan la más variada topografía.

En la parte inicial del oleoducto una "estación de bombeo" impulsa el petróleo y, dependiendo de la topografía por donde éste pase, se colocan estratégicamente otras estaciones para que le permitan superar sitios de gran altura, como las cordilleras en Colombia.

Los oleoductos disponen también de válvulas que permiten controlar el paso del petróleo y atender oportunamente situaciones de emergencia, como las que periódicamente ocurren en Colombia por efecto de las voladuras.

El gas natural se transporta en idénticas circunstancias, pero en este caso la tubería se denomina "gasoducto".

Hay ductos similares que cumplen funciones específicas: poliductos para gasolinas, acpm y otros derivados; propanoductos para gas propano, combustoleoductos para combustóleo, etc.

Los buque-tanques son a su vez enormes barcos dotados de compartimientos y sistemas especialmente diseñados para el transporte de petróleo crudo, gas, gasolina o cualquier otro derivado. Son el medio de transporte más utilizado para el comercio mundial del petróleo.

La capacidad de estas naves varía según el tamaño de las mismas y de acuerdo con el servicio y la ruta que cubran. Algunas pueden transportar cientos de miles de barriles e incluso millones.





### III ¿QUÉ ES CORROSIÓN?

Se entiende por corrosión la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. La característica fundamental de este fenómeno, es que sólo ocurre en presencia de un electrólito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas anódicas y catódicas: una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas. En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente en la región catódica la inmunidad del metal.

Este mecanismo que es analizado desde un punto de vista termodinámico electroquímico, indica que el metal tiende a retornar al estado primitivo o de mínima energía, siendo la corrosión por lo tanto la causante de grandes perjuicios económicos en instalaciones enterradas.

Los materiales al ser expuestos a las condiciones ambientales, una vez extraídos, tienden a estabilizarse química y energéticamente. El paso espontáneo de estos materiales a su estado natural combinado, es llamado **CORROSIÓN**. Son ejemplos los metales en contacto con ácidos o álcalis concentrados y la formación de óxido de hierro por disociación del agua en contacto con tubos de caldera recalentados, Sin embargo, la mayoría de los fenómenos que comprenden la corrosión de metales que contienen agua o están sumergidos en ella, o su corrosión en la atmósfera por películas de humedad, son de naturaleza electroquímica

El proceso de corrosión especialmente en los metales, es un proceso **ELECTRO-QUÍMICO**, donde se suceden reacciones de oxidación y reducción, estableciéndose un intercambio de electrones, y consecuentemente el paso de una corriente eléctrica de componente continua entre un ánodo y un cátodo, a través de un medio conductor, como en una pila galvánica.

Ya que, en líneas de tuberías enterradas y/o sumergidas en un electrólito se ha observado que los procesos de corrosión son electroquímicos, se analizara la corrosión que ocurre por reacciones electroquímicas. En estos procesos de corrosión se tiene la presencia de un par galvánico activo originado por uno o diversos factores, mismos que se ilustraran y analizaran en secciones posteriores.





### III.1.1 ¿POR QUÉ EXISTE LA CORROSIÓN?

Ahora bien, uno puede preguntarse ¿por qué existe la corrosión? Podemos empezar diciendo que la corrosión de los metales es en cierto sentido inevitable, una pequeña venganza que se toma la naturaleza por la continua explotación a que la tiene sometida el hombre. Recordemos que los metales, salvo alguna que otra rara excepción, como los metales nobles (oro, platino, etc., se encuentran en estado nativo en la Tierra), no existen como tales en naturaleza, sino combinados con otros elementos químicos formando los minerales, como los óxidos, sulfuros, carbonatos, etc.

Para la obtención de los metales en estado puro, debemos recurrir a su separación a partir de sus minerales, lo cual supone un gran aporte energético. Pensemos solamente en el enorme consumo de energía eléctrica que supone el funcionamiento de una acería para obtener un material tan indispensable para el desarrollo actual, como el acero. Pues bien, producido el acero, éste prácticamente inicia el periodo de retorno a su estado natural, los óxidos de hierro. Figura 1.

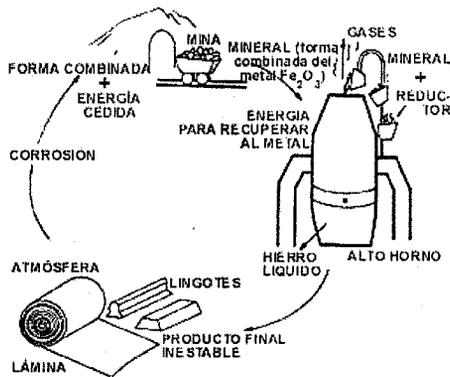
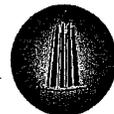


Figura 1

Esta tendencia a su estado original no debe extrañar. Si después de milenios el hierro se encuentra en los yacimientos bajo la forma de óxido, es que este compuesto representa el estado más estable del hierro respecto al medio ambiente. El mineral de hierro más común, la hematita, es un óxido de hierro,  $Fe_2O_3$ . El producto más común de la corrosión del hierro, la herrumbre, tiene la misma composición química. Un metal susceptible a la corrosión, como el acero, resulta que proviene de óxidos metálicos, a los cuales se los somete a un tratamiento determinado para obtener precisamente hierro. La tendencia del hierro a volver a su estado natural de óxido metálico es tanto más fuerte, cuanto que la energía necesaria para extraer el metal del mineral es mayor. El aluminio es otro ejemplo de metal que obtenido en estado puro se oxida rápidamente, formándose sobre su superficie una capa de alúmina ( $Al_2O_3$ , óxido de aluminio).





La razón de ello estriba en el gran aporte energético que hay que realizar para obtener una determinada cantidad del metal a partir del mineral, bauxita ( $Al_2O_3$ ) en este caso.

Entonces, la fuerza conductora que causa que un metal se oxide es consecuencia de su existencia natural en forma combinada (oxidada). Para alcanzar este estado metálico, a partir de su existencia en la naturaleza en forma de diferentes compuestos químicos (minerales), es necesario que el metal absorba y almacene una determinada cantidad de energía. Esta energía le permitirá el posterior regreso a su estado original a través de un proceso de oxidación (corrosión). La cantidad de energía requerida y almacenada varía de un metal a otro. Es relativamente alta para metales como el magnesio, el aluminio y el hierro y relativamente baja para el cobre y la plata.

En la tabla siguiente se presenta una lista de algunos metales, situados en orden a la cantidad de energía requerida, de mayor a menor, para convertirlos desde su estado mineral al estado metálico.

Posiciones relativas de algunos metales en cuanto a la energía requerida para convertir sus minerales en metales.

MAYOR REQUERIMIENTO DE ENERGÍA:	MENOR REQUERIMIENTO DE ENERGÍA:
Potasio	Oro
Magnesio	
Berilio	
Aluminio	
Cinc	
Cromo	
Hierro	
Níquel	
Estaño	
Cobre	
Plata	
Platino	

De las diversas operaciones que deben realizarse para extraer el metal del mineral, la primordial se puede resumir en una sola palabra: *reducción*. Inversamente, las transformaciones sufridas por el metal que retorna a su estado original, también pueden resumirse en: *oxidación*.





Según esto, la corrosión puede describirse en primer término como una reacción de oxidación, semejante por tanto a cualquier oxidación química. Por esto mismo, debe y puede ser regida por las leyes establecidas por la física y la química. Un metal sólo podrá corroerse, o sea, pasar a un estado más oxidado, cuando sea inestable con respecto a los productos formados por su corrosión. Esta inestabilidad puede preverse en términos energéticos.

La termodinámica permite realizar los balances de energía que, para el caso de los metales puros colocados en una situación bien determinada, permitirán predecir su comportamiento; en este caso, si aparecerá o no en ellos tendencia a la corrosión.

La energía de un determinado sistema puede medirse en los términos de lo que se llama la energía libre. Se pueden presentar tres casos:

- a) *la energía libre es positiva.* El metal es activo y puede haber corrosión. Es el caso más frecuente entre los metales de uso común (hierro, aluminio, cinc);
- b) *la energía libre es positiva,* pero el metal en vez de presentar corrosión, permanece inatacado aparentemente. Se dice que el metal está pasivo ó pasivado;
- c) *la energía libre es cero o negativa.* El metal es indiferente a los agentes agresivos habituales, no siendo posible ninguna reacción de corrosión. Es el caso de los metales nobles.

Podemos resumir todo lo anterior diciendo que es posible prever el comportamiento de un determinado metal en un medio ambiente dado, ayudándonos de las predicciones que nos aporta la termodinámica. Así si el sistema formado por el metal y el medio ambiente posee una energía libre positiva, es posible que tenga lugar la corrosión. Si bien los entornos o ambientes para un metal pueden ser muy específicos (pensemos por ejemplo en los metales con los que se construye un reactor nuclear), uno de los más generales, es el más común a la vida humana: *la atmósfera.*

Como se verá más adelante, la presencia simultánea de agua (electrolito) y oxígeno (oxidante) hacen prácticamente inevitable la corrosión en estas condiciones para la mayoría de los metales más utilizados (hierro, aluminio, cinc, etc.). La reacción de oxidación en el sistema formado presenta una energía libre positiva. Volvemos a lo que decíamos al principio: *la corrosión parece inevitable.*

### III.1.2 LA CORROSIÓN ELECTROQUÍMICA

En presencia de un medio acuoso, la corrosión es de naturaleza electroquímica. Tal corrosión es un proceso espontaneo que denota la existencia de una zona anódica (que sufre la corrosión), una zona catódica y un electrolito, siendo imprescindible la presencia de estos tres elementos para que este tipo de corrosión pueda existir (se requiere asimismo de contacto eléctrico entre la zona anódica y la catódica).





El término *ánodo* se emplea para describir aquella porción de una superficie metálica en la que tiene lugar la corrosión (disolución) y en la cual se liberan electrones como consecuencia del paso del metal en forma de iones, al electrolito. La reacción que sucede en el ánodo, por ejemplo para el caso del cinc, es:

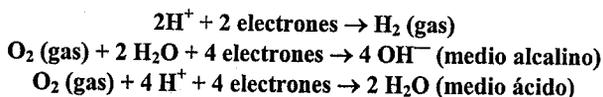


o sea, una reacción de oxidación.

Como los electrones, en un conductor metálico, se mueven en sentido opuesto al convencional, en el ánodo la corriente eléctrica sale del metal para entrar a la solución (figura 2). El término *cátodo* se aplica a la porción de una superficie metálica en la cual los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones presentes en el electrolito.

En un conductor metálico, sólo son libres las cargas negativas o electrones libres. De aquí que toda la corriente en un conductor metálico se produce por el movimiento de cargas negativas y, por tanto, los electrones se mueven en sentido opuesto al convencional.

Las reacciones catódicas más comunes en presencia de agua son:



o sea, reacciones de reducción.

En el cátodo, la corriente eléctrica sale del electrolito para entrar al metal (figura 2), cerrándose el circuito eléctrico a través de un conductor metálico externo.

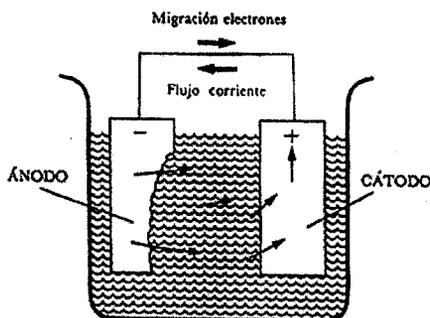


Figura 2. Dirección del flujo de corriente entre un ánodo y un cátodo en una celda de corrosión.





Los componentes esenciales se presentan en la figura 2. Las flechas representan corrientes eléctricas (no electrones) fluyendo a la solución desde el ánodo (—) al cátodo (+) y regresando desde el cátodo al ánodo a través de un hilo metálico conductor (cobre por ejemplo).

La corrosión más frecuente es toda de naturaleza electroquímica y resulta de la formación de multitud de zonas anódicas y catódicas sobre la superficie metálica, siendo el electrolito, caso de no estar el metal sumergido o enterrado, el agua de condensación de la atmósfera, para lo cual se necesita que la humedad relativa del aire sea del orden del 70% o superior.

El proceso de disolución de un metal en un ácido (por ejemplo, cinc en ácido clorhídrico) es igualmente un proceso electroquímico. La infinidad de burbujas que aparecen sobre la superficie metálica corresponden a la formación de hidrógeno,  $H_2$ , gaseoso, poniendo de manifiesto la existencia de infinitos cátodos, mientras en los ánodos se va disolviendo el metal.

Al cambiar continuamente de posición estas zonas anódicas y catódicas, llega un momento en que el metal se disuelve continuamente. Este tipo de corrosión se caracteriza porque casi siempre es más pronunciada en una zona que en otras, y su forma de manifestarse más característica es la aparición de picaduras.

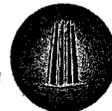
### III.1.3 LAS MANIFESTACIONES DE LA CORROSIÓN

La corrosión, especialmente la de naturaleza electroquímica, se puede manifestar de muy diversas maneras.

Por lo que hace referencia al metal más comúnmente empleado, el hierro, la presencia de la herrumbre constituye la manifestación de que se está desarrollando un proceso de corrosión. Pero entonces, la pregunta que nos podríamos hacer es ésta: ¿Qué hay más allá de la herrumbre?

El producto primario de la oxidación del hierro es el hidróxido ferroso blanco,  $Fe(OH)_2$  que a su vez se oxida a hidróxido férrico de color rojizo,  $Fe(OH)_3$ .

Ayudémonos de una experiencia muy sencilla para comprender lo anterior. Veamos el ataque producido por una gota de agua salada. Esta experiencia es debida a Evans, uno de los investigadores que más han contribuido al conocimiento de la corrosión. Evans demostró que en el caso de una gota de agua salada, las diferencias en la cantidad de oxígeno disuelto en el líquido en contacto con la superficie metálica, lo que se conoce como *aireación diferencial*, crean pilas de corrosión en las que el ataque del metal ocurre en las áreas menos oxigenadas, provocando una corrosión rápida e intensa. Si se deposita una gota de agua salada (agua y cloruro de sodio) sobre la superficie horizontal de una lámina de acero perfectamente limpia y desgrasada, como en la figura 3, se puede observar, por ejemplo después de unos 30 minutos, un precipitado en el medio de la gota.



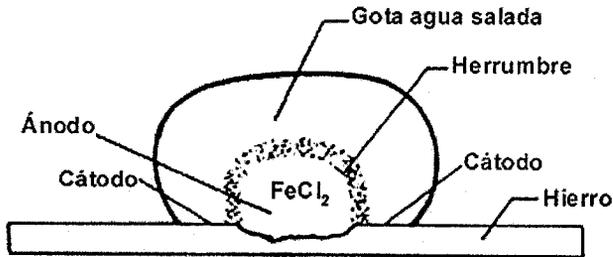


Figura 3. Ataque producido por una gota de agua salada.

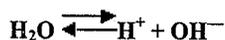
La parte periférica o más exterior de la gota, más aireada (con un más fácil acceso para el oxígeno) que el centro, juega el papel de lo que hemos llamado cátodo, con relación al centro, que a su vez se convierte en ánodo. Entre estas dos zonas se forma una membrana de hidróxido de hierro (herrumbre). Con ayuda de un tubo capilar, se puede atravesar la membrana y comprobar la formación en el centro de la gota de una sal ferrosa ( $\text{FeCl}_2$ , cloruro ferroso).

La presencia de la herrumbre es una manifestación clara de la existencia de corrosión para el caso del hierro y sus aleaciones (aceros). Para la mayoría de los metales, las manifestaciones de la corrosión pueden estudiarse en función de la forma o tipo de corrosión. En soluciones acuosas o en atmósferas húmedas, como ya se ha indicado, el mecanismo de ataque envuelve algunos aspectos electroquímicos. Debe de existir un flujo de electricidad desde unas ciertas áreas a otras en la superficie metálica, a través de una solución (electrolito) capaz de conducir la electricidad, tal como el agua de mar o el agua dura (agua con un alto contenido de sales).

Una solución que conduce la electricidad es un electrolito. Su cualidad para conducir la electricidad es debida a la presencia de iones. Éstos, son átomos cargados positiva o negativamente o bien agrupaciones de átomos con una cierta carga eléctrica, en solución.

El agua pura está ionizada en proporción muy pequeña. Sólo una mínima fracción de las moléculas de agua se disocia en iones hidrógeno,  $\text{H}^+$  (protones), y iones hidroxilo,  $\text{OH}^-$ . El ión hidrógeno se une a una molécula de agua,  $\text{H}_2\text{O}$ , para formar un ión hidronio,  $\text{H}_3\text{O}^+$ , aunque por facilidad lo representaremos por  $\text{H}^+$ .

La disociación del agua,  $\text{H}_2\text{O}$ , puede representarse así:





A efectos prácticos, el agua es un aislador casi perfecto. Entonces, cabría preguntarse ¿por qué una sustancia iónica disuelta en agua produce iones? La respuesta está en las propiedades dieléctricas del agua, o, en otras palabras, en las propiedades polares de las moléculas de agua. Cada molécula de agua es un pequeño dipolo, esto es, sus cargas positiva y negativa no coinciden. Podemos representar estos dipolos de un modo exagerado por estructuras de forma oval.

Alrededor de un ión positivo habrán agrupadas un cierto número de moléculas de agua con sus extremos negativos próximos al catión. De modo análogo, los extremos positivos de algunas moléculas de agua se agruparán alrededor del ión negativo. De acuerdo con esta explicación, los iones de las sustancias disueltas deben estar libres en cualquier disolvente polar, como lo es el agua, como así ocurre en realidad.

Un electrolito capaz de formar un ambiente corrosivo puede ser, en principio, cualquier solución, lluvia o incluso la humedad condensada del aire. Puede abarcar desde el agua dura o salada hasta los ácidos y álcalis fuertes.

Los ánodos y cátodos involucrados en un proceso de corrosión se conocen como *electrodos*. Los electrodos pueden consistir en dos diferentes tipos de metal. En el *electrodo negativo* (ánodo) es donde tiene lugar la corrosión.

Podemos resumir lo anterior diciendo que para que exista corrosión deben cumplirse unas ciertas condiciones mínimas. Éstas son:

1. Debe haber un ánodo y un cátodo.
2. Debe existir un potencial eléctrico entre los dos electrodos (ánodo y cátodo).
3. Debe haber un conductor metálico que conecte eléctricamente el ánodo y el cátodo.
4. Tanto el ánodo como el cátodo deben estar sumergidos en un electrolito conductor de la electricidad, el cual está ionizado.

Una vez cumplidas estas condiciones, puede circular una corriente eléctrica dando lugar a un consumo de metal (corrosión) en el ánodo.

La diferencia de potencial creada entre el ánodo y el cátodo provoca una migración de electrones desde el *ánodo al cátodo* a lo largo del conductor metálico externo, un alambre de cobre por ejemplo, como se indica en la figura 4.



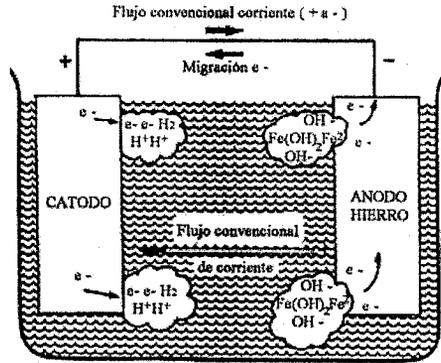


Figura 4. Sentido del flujo de electrones y del flujo convencional de la corriente eléctrica en una celda de corrosión.

En el ánodo, al perder electrones, quedan iones hierro cargados positivamente,  $Fe^{2+}$ , los cuales pueden combinarse con iones cargados negativamente,  $OH^-$ , que se encuentran en las inmediaciones del ánodo, pudiéndose formar ocasionalmente hidróxido ferroso,  $Fe(OH)_2$ , el cual puede reaccionar con posterioridad para formar hidróxido férrico,  $Fe(OH)_3$ , la ya conocida herrumbre.

Al cátodo, procedentes del ánodo van llegando, a través del conductor metálico externo, electrones. Estos electrones cargados negativamente, al llegar a la interfase cátodo-solución, se combinan con los iones hidrógeno cargados positivamente,  $H^+$ , para formar hidrógeno gas,  $H_2$ . Cuando los iones hidrógeno se convierten en hidrógeno gaseoso, al combinarse con los electrones procedentes del ánodo, se crea un exceso de iones  $OH^-$  en las inmediaciones del cátodo. Este exceso de iones  $OH^-$  hace que aumente la alcalinidad y, por tanto, el pH del electrolito adyacente al cátodo.

Desde un punto de vista conceptual, hay algunos puntos de importancia que conviene aclarar por lo que respecta al flujo de la corriente eléctrica. El concepto convencional de corriente supone un flujo desde un potencial positivo (+) a un potencial negativo (-). Esto puede llevar a una cierta confusión, ya que la representación convencional del flujo de la corriente eléctrica es precisamente en la dirección opuesta al flujo de los electrones, como se indica en la figura 4.

Conviene recordar los siguientes puntos, en los términos del flujo de corrientes convencionales:







### III.2 FORMAS DE CORROSIÓN

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

1. **Naturaleza de la substancia corrosiva:** La corrosión puede ser clasificada como húmeda o seca. Para la primera se requiere un líquido o humedad mientras que para la segunda, las reacciones se desarrollan con gases a alta temperatura.
2. **Mecanismo de corrosión:** Este comprende las reacciones electroquímicas o bien, las reacciones químicas.
3. **Apariencia del metal corroído:** La corrosión puede ser uniforme y entonces el metal se corroe a la misma velocidad en toda su superficie, o bien, puede ser localizada, en cuyo caso solamente resultan afectadas áreas pequeñas.

La clasificación por apariencia, uniforme o localizada, es muy útil para una discusión preliminar que en caso de requerirse en forma más completa, necesita del establecimiento de las diferencias entre la corrosión localizada de tipo macroscópico y el ataque microscópico local.

**UNIFORME:** Se presenta en su totalidad del área expuesta, la reducción del espesor es uniforme. Se presenta en metales expuestos en la atmósfera así como enterrados.

**LOCALIZADA:** Se manifiesta en pequeñas áreas más deterioradas que otras y dependiendo de este deterioro puede ser macroscópico o microscópica.

**MACROSCÓPICA:** La podemos observar a simple vista, sin ayuda de ningún equipo óptico.

**MICROSCÓPICA:** En el ataque microscópico, la cantidad del metal disuelto es mínima, y puede conducir a daños muy considerables antes de que el problema sea visible. Existen dos fenómenos bien identificados y sólo visibles con la ayuda de un equipo óptico, y son los siguientes:

**Ataque intergranular.-** Se da en los límites de grano debido a que el límite tiene una composición química diferente y se ven atacados más rápidamente que la masa del metal, produciendo un debilitamiento o fragilización del mismo.

**Agrietamiento por corrosión.-** Este es un fenómeno no comprendido hasta el momento totalmente, pero se ha visto que sucede en ciertos materiales y en ciertos medios sujetos a esfuerzos.





### III.2.1 CORROSIÓN GALVANICA Y UNIFORME

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, siendo necesario seleccionar los materiales de construcción y los métodos de protección como pintura, para controlarla.

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.

La corrosión galvánica se presenta, cuando dos metales diferentes en contacto o conectados por medio de un conductor eléctrico, son expuestos a una solución conductora. En este caso existe una diferencia en potencial eléctrico entre los metales diferentes y sirve como fuerza directriz para el paso de la corriente eléctrica a través del agente corrosivo, de tal forma que el flujo de corriente corroe uno de los metales del par formado.

Mientras más grande es la diferencia de potencial entre los dos metales, mayor es la probabilidad de que se presente la corrosión galvánica debiéndose notar que este tipo de corrosión sólo acusa deterioro en uno de los metales, mientras que el otro metal del par casi no sufre daño.

El metal que se corroe recibe el nombre de metal activo, mientras que el que no sufre daño se le denomina metal más noble.

La relación de áreas entre los dos metales es muy importante, ya que un área muy grande de metal noble comparada con el metal activo, acelerará la corrosión, y por el contrario, una mayor área del metal activo comparada con el metal noble disminuye el ataque del primero.

La corrosión galvánica a menudo puede ser reconocida por el incremento del ataque junto a la unión de los dos metales, y este tipo puede ser controlado por el uso de aislamientos o restringiendo el uso de uniones de metales cuando ellos forman diferencias de potencial muy grande en el medio ambiente en el que se encuentran. La diferencia de potencial puede ser medida, utilizando como referencia la serie galvánica de los metales y aleaciones que se presentan más adelante, en la serie de los potenciales tipo (standard) de óxido de reducción. Otro método para reducir la corrosión galvánica, es evitar la presencia de grandes áreas de metal noble con respecto a las de metal activo.

### III.2.2 CORROSIÓN POR EROSIÓN

Cuando el movimiento del medio corrosivo sobre la superficie metálica incrementa la velocidad de ataque debido a desgaste mecánico, éste recibe el nombre de corrosión por erosión.





La importancia relativa del desgaste mecánico y la corrosión, es a menudo difícil de establecer y varía grandemente de una situación a otra, y el mecanismo de la erosión generalmente se atribuye a la remoción de películas superficiales protectoras, como por ejemplo, películas de óxido formadas por el aire, o bien, productos adherentes de la corrosión.

La corrosión por erosión, generalmente tiene la apariencia de picaduras poco profundas de fondo terso, y el ataque puede presentar también una distribución direccional debido al camino seguido por el agente agresivo cuando se mueve sobre la superficie del metal.

La corrosión por erosión prospera en condiciones de alta velocidad, turbulencia, choque, etc., y frecuentemente se observa en impulsores de bomba, agitadores y en codos y en cambios de dirección de tuberías. Los líquidos con suspensión conteniendo partículas sólidas duras pueden igualmente causar este tipo de problema.

La corrosión por erosión puede ser evitada por cambios de diseño o por selección de materiales más resistentes.

La corrosión por cavitación y desgaste (fretting) son formas especiales de la corrosión por erosión. La primera es causada por la formación y el 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 (fretting) 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.

La corrosión se cree que juega uno de los siguientes papeles: el calor de la fricción oxida el metal y a continuación 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.

### III.2.3 CORROSIÓN POR AGRIETAMIENTO

Las condiciones ambientales en una grieta, pueden con el tiempo volverse muy diferentes de las existentes en una superficie limpia y abierta, por lo que un medio ambiente muy agresivo puede desarrollar y causar corrosión en las grietas.





Las grietas o hendiduras generalmente se encuentran en los empaques, traslapes, tornillos, remaches, etc., y también pueden formarse por depósitos de suciedad, productos de la corrosión y raspaduras en las películas de recubrimiento.

La corrosión por agrietamiento, generalmente se atribuye a los siguientes factores:

- a) Cambios de acidez en la grieta o hendidura.
- b) Escasez de oxígeno en la grieta.
- c) Desarrollo de iones diferentes en la hendidura.
- d) Agotamiento de inhibidor en la grieta.

Al igual que todas las formas de corrosión localizada, la corrosión por agrietamiento no ocurre en todas las combinaciones metal-agente corrosivo, y algunos materiales son más susceptibles para producirla que otros, como por ejemplo aquellos que dependen de las películas productoras de óxido formadas por el aire para adquirir su resistencia a la corrosión, tal y como sucede con acero inoxidable y el titanio. Estos materiales pueden ser aleados para mejorar su resistencia y el diseño deberá hacerse de tal manera, que se reduzcan las hendiduras; tratando de mantener las superficies limpias para combatir este tipo de corrosión.

### III.2.4 CORROSIÓN POR PICADURA

La corrosión por picadura se presenta por la formación de orificios en una superficie relativamente inatacada y las picaduras pueden tener varias formas.

La forma de una picadura es a menudo responsable de su propio avance, por las mismas razones mencionadas en la corrosión por agrietamiento, es decir, una picadura pueden ser considerada como una grieta o hendidura formada por la misma.

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 corrosión por picadura es un proceso lento que puede llevarse meses y años antes de ser visible, pero que naturalmente, causara 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.

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.





### III.2.5 CORROSIÓN POR EXFOLIACION Y DISOLUCION SELECTIVA

La corrosión por exfoliación es una corrosión subsuperficial que comienza sobre una superficie limpia, pero que se esparce debajo de ella y difiere de la corrosión por picadura en que el ataque tiene una apariencia laminar.

Capas completas de material son corroídas y el ataque es generalmente reconocido por el aspecto escamoso y en ocasiones ampollado de la superficie.

Al final del ataque, una muestra tiene la apariencia de un mazo de barajas en el cual algunas de las cartas han sido extraídas. Este mecanismo es bien conocido en las aleaciones de aluminio y se combate utilizando aleaciones y tratamientos térmicos.

La corrosión por disolución selectiva se produce al efectuarse la remoción de uno de los elementos de una aleación siendo el ejemplo más común la eliminación del zinc en aleaciones de cobre – zinc, conocidos con el nombre de dezincificación. Este fenómeno corrosivo produce un metal poroso que tiene propiedades mecánicas muy pobres y obviamente el remedio a este caso es el empleo de aleaciones que no sean susceptibles a este proceso.

### III.2.6 CORROSIÓN INTERGRANULAR O INTERCRISTALINA

Para entender este tipo de ataque es necesario considerar que cuando un metal fundido se cuela 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 espaciamentos 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, esta 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. La corrosión generalmente ocurre, por que 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 inter cristalina, 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 los granos.





El fenómeno de límite de grano que causa la corrosión inter cristalina, 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.

### III.2.7 CORROSIÓN DE FRACTURA POR TENSION

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 pocas. 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 inter cristalinos o transcristalinos que a menudo presentan una tendencia a la ramificación.

Algunas 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.

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





El termino de fragilización por hidrogeno se confunde frecuentemente con la corrosión de fractura por tensión, debido a que el hidrogeno 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 hidrogeno introducido en el metal sin corrosión de este, por ejemplo, en la protección catódica, no es definitivamente corrosión de fractura por tensión.
- b) La fractura debido al hidrogeno producido 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 hidrogeno se produce y la fractura se presenta posteriormente cuando la tensión es aplicada después de la reacción corrosiva con liberación de hidrogeno.
- c) Cuando el hidrogeno 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 si se considera que la corrosión pertenece al tipo de corrosión de fractura por tensión.

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, de tal forma que 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.

Los métodos para evitar la corrosión por fatiga, necesitan prevenir la fractura producida por ésta desde el principio, ya que es muy difícil detener la propagación de las fracturas, una vez que se inician.

De lo indicado anteriormente, se ve la necesidad de reconocer en primer lugar, las diferentes formas en las que se presenta la corrosión para así tomar las medidas pertinentes que permitan establecer los métodos correctivos para atenuarla, los cuales son mejor comprendidos si se conoce la teoría de la corrosión.

### III.2.8 QUÍMICA Y ELECTROQUÍMICA DE LA CORROSION

La corrosión como una reacción química.- Para poder comprender el fenómeno corrosivo como el resultado de una reacción química, es necesario disponer de algunos principios elementales de química, los cuales se enunciaran brevemente a continuación:

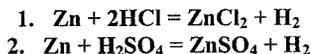




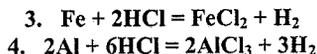
### III.2.9 CORROSIÓN EN ÁCIDOS

Es de todos conocido que una de las formas de obtener hidrógeno en el laboratorio, es colocar un pedazo de zinc metálico dentro de un vaso conteniendo un ácido diluido, tal como el clorhídrico o el sulfúrico.

Al depositarse el zinc en la solución ácida, el zinc se ataca rápidamente desprendiéndose el hidrogeno, tal y como se indica en las reacciones 1 y 2.



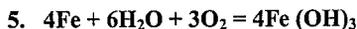
Otros metales también son corroídos o disueltos por medio de ácidos liberando hidrógeno.



Las reacciones 3 y 4 muestran que el hierro y aluminio también son corroídos por el ácido clorhídrico.

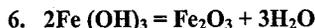
### III.2.10 CORROSIÓN EN SOLUCIONES NEUTRAS Y ALCALINAS

La corrosión de los metales también puede presentarse en agua limpia, agua de mar, soluciones salinas alcalinas o básicas. En la mayoría de estos sistemas, la corrosión solamente ocurre cuando éstas contienen oxígeno disuelto. Las soluciones acuosas disuelven rápidamente el oxígeno del aire, siendo éste la fuente de oxígeno requerida en los procesos corrosivos. La corrosión más familiar de este tipo, es la oxidación del hierro cuando se expone a una atmósfera húmeda o bien en agua.

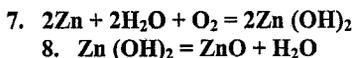


Esta reacción muestra que el hierro se combina con el agua y el oxígeno para darnos la substancia insoluble de color café rojizo que es el hidróxido férrico.

Durante la oxidación en la atmósfera, existe la oportunidad de que el producto de la reacción se seque, por lo que el hidróxido férrico se deshidrata y forma el óxido café rojizo que es tan familiar.



Reacciones similares se presentan cuando el zinc se expone al agua o en aire húmedo.

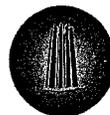
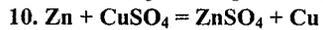
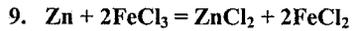




El óxido de zinc resultante es el depósito blanco que se observa en los equipos galvanizados.

### III.2.11 CORROSIÓN EN OTROS SISTEMAS

Los metales también pueden ser atacados en soluciones que no contengan oxígeno o ácidos. Las soluciones típicas para este proceso son aquellas soluciones denominadas oxidantes que contienen sales férricas y compuestos cúpricos en los que la corrosión se presenta de acuerdo con las siguientes reacciones:





### III.3 MEDICIÓN DE LA CORROSIÓN

Desde un punto de vista práctico, es interesante conocer *a priori* la resistencia a la corrosión de un determinado metal o aleación en un medio ambiente específico. Sobre la base de ensayos en el laboratorio, se pueden llegar a establecer las condiciones ambientales más fielmente parecidas a la realidad y, por tanto, estudiar el comportamiento de un metal o varios metales en este medio.

La realización de estos ensayos en el laboratorio puede ser fácil o extraordinariamente difícil, según la naturaleza del medio estudiado.

Dos casos extremos nos podrán servir de ejemplo para ilustrar lo anterior. Si se necesita evaluar el comportamiento o la resistencia a la corrosión de un acero respecto a un ácido mineral, por ejemplo, clorhídrico, bastará con preparar soluciones de diferente concentración de este ácido y sumergir en cada una de ellas, una muestra del acero que se piensa ensayar. La resistencia a la corrosión de tal acero se puede evaluar, por ejemplo, por la pérdida de peso experimentada antes y después del ensayo. Obtendremos para cada solución ensayada un valor de la velocidad de corrosión que nos permitirá prever el comportamiento de este acero en unas condiciones muy cercanas a las de su utilización. La realización de estos ensayos, en este caso, no representa excesivas dificultades.

Pensemos ahora que estamos interesados en prever la corrosión de un acero que se va a emplear para la construcción del casco de un barco. Aquí, dada la naturaleza del medio es muy difícil, por no decir imposible, poder fijar en el laboratorio las condiciones ambientales en las que se va a encontrar el barco. Pensemos en la misma naturaleza del agua de mar, mezclas de sales, su diferente composición en cuanto a los mares que pueda surcar el barco, diferencia de temperaturas y un muy largo tiempo de navegación, etcétera.

En este caso, los ensayos de laboratorio son tremendamente complicados y difíciles, no siendo casi nunca posible fijar las condiciones experimentales en el laboratorio, siquiera de una manera aproximada a la realidad. Son tan numerosos y complejos los factores de la corrosión que intervienen en los medios naturales que es prácticamente imposible reproducirlos en el laboratorio.

De una manera muy general y en función del objetivo perseguido (selección de materiales, estudios de la resistencia a la corrosión o bien del mecanismo de la corrosión, etc.) los ensayos de corrosión se pueden englobar en dos grandes categorías:

- a) ensayos acelerados realizados en el laboratorio;
- b) ensayos de larga duración efectuados en los medios naturales.

#### III.3.1 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN

El método utilizado tradicionalmente y que se viene creando hasta la fecha, es el de medida de la pérdida de peso. Como su nombre indica, este método consiste en determinar la pérdida de peso que ha experimentado un determinado metal o aleación en contacto con un medio corrosivo.





Las unidades más frecuentemente utilizadas para expresar esa pérdida de peso son: miligramos decímetro cuadrado día (mdd), milímetros por año (mm/año), pulgadas por año o mili pulgadas por año (mpy, abreviatura en inglés). Así por ejemplo, si para una determinada aplicación podemos evaluar, mediante una serie de ensayos previos, la pérdida de peso de dos aceros en el mismo medio agresivo, podemos tener una idea de qué material se podrá emplear con mayores garantías, desde un punto de vista de resistencia a la corrosión, sin tener en cuenta otros muchos requerimientos y propiedades que para nuestro ejemplo, vamos a suponer iguales.

Supongamos que el resultado de los ensayos efectuados sea el siguiente:

	Pérdida de peso
Acero 1	4.1 mm/año
Acero 2	2.3 mm/año

Evidente, la selección en este caso favorecerá al acero con una menor velocidad de corrosión, el acero 2.

Las unidades anteriormente citadas constituyen las de mayor utilización en Ingeniería de la Corrosión.

### III.3.2 MEDIDA DE LA VARIACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Hemos visto en el primer capítulo que existen diferentes formas de corrosión. La medida de la velocidad de corrosión por el método de la medida de la pérdida de peso supone el caso de la corrosión generalizada o uniforme, que es la que sufre el acero con más frecuencia.

La corrosión localizada supone muy a menudo una pérdida mínima de material, pero en cambio puede alterar drásticamente sus propiedades mecánicas. Por tanto, un control de esas propiedades mecánicas puede poner de manifiesto este tipo de ataque. Por ejemplo, un ensayo de tracción permitirá determinar la resistencia del metal atacado en comparación con una probeta del mismo material que no haya sido sometida a las condiciones del medio agresivo. Diferentes formas de corrosión, entre ellas la corrosión fisurante que se vio como responsable de la rotura del tambor de las lavadoras automáticas, son posibles de detectar y en su caso de controlar, mediante los ensayos y sus variaciones correspondientes en las propiedades mecánicas.

La aplicación masiva de los aceros inoxidable ha traído consigo la aparición de nuevas formas de corrosión, a las que son especialmente susceptibles éstos. Por ejemplo, los aceros inoxidable austeníticos pueden sufrir la llamada corrosión inter granular, debida a una precipitación de carburos de cromo en los bordes de grano, como consecuencia de un tratamiento térmico inadecuado. La localización de este tipo de corrosión puede realizarse mediante un examen metalográfico con un microscopio clásico de luz reflejada que permite visualizar la estructura superficial del metal, haciendo presente cualquier tipo de ataque, sea inter granular, como en el caso citado, o bien transgranular.





El desarrollo de los microscopios electrónicos de barrido permite actualmente lograr una excelente identificación de las formas de corrosión localizada que ocurren en los diferentes metales y aleaciones. La presencia, en muchos microscopios electrónicos de barrido, de un analizador de rayos X, permite además, un análisis puntual y con ello determinar la naturaleza de los constituyentes afectados por el proceso de corrosión, así como estudiar la influencia de ciertas adiciones y el efecto de diversos tratamientos térmicos, capaces de modificar la estructura del metal o aleación empleado.

La demostrada naturaleza electroquímica de los procesos de corrosión, especialmente de los que tienen lugar a la temperatura ambiente (corrosión atmosférica) o a temperaturas inferiores a los 100°C (frecuente en la mayoría de procesos industriales) ha permitido la aplicación de los métodos electroquímicos modernos, al estudio de la corrosión de los metales y en consecuencia, a la medición de la velocidad de corrosión.

Todas las técnicas electroquímicas modernas están basadas prácticamente en el desarrollo de un aparato que se conoce con el nombre de potencióstato. El potencióstato es un instrumento electrónico que permite imponer a una muestra metálica colocada en un medio líquido y conductor, un potencial constante o variable, positivo o negativo, con respecto a un electrodo de referencia. Este electrodo de referencia no forma parte del circuito de electrólisis y, por el mismo, no circula corriente alguna. Su presencia se debe exclusivamente a que sirve de referencia para poner a prueba en todo momento el potencial de la probeta metálica que se está ensayando.

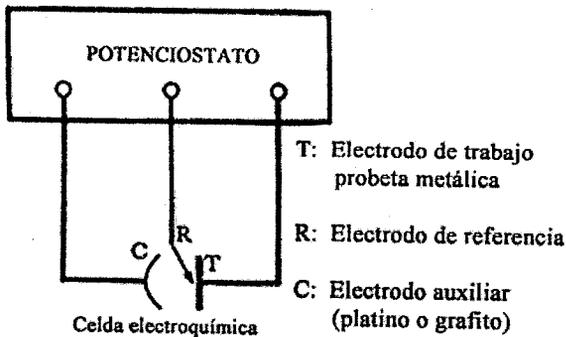


Figura 21. Potencióstato.

Para cerrar el circuito de electrólisis se utiliza un tercer electrodo, por lo general de un material inatacable por el medio en que se realiza la experiencia (platino o grafito, por ejemplo).





De una manera sencilla podemos entender el funcionamiento del potencióstato. Tomemos al hierro como metal de prueba. Si una solución (por ejemplo, un ácido mineral) es muy agresiva con el hierro, el ataque del metal producirá un paso importante de electrones, en forma de iones de hierro cargados positivamente, a la solución. Esta producción de electrones es la responsable del alto potencial negativo de disolución del hierro en un medio agresivo. Se puede entender fácilmente que con la ayuda de una fuente externa de corriente, será posible tanto acelerar como frenar esta emisión de electrones y, por consiguiente, aumentar o detener la corrosión del hierro por modificación de su potencial.

Si a partir del valor del potencial de corrosión, y mediante la fuente externa de potencial, aumentamos éste en la dirección positiva (anódica), se puede llegar a obtener el llamado diagrama o curva de polarización potencióstática, la cual es de mucha utilidad para prever y predecir el comportamiento de materiales metálicos en unas condiciones dadas.

En la figura se presenta el diagrama que se obtiene para el caso de un acero en una solución de ácido sulfúrico,  $H_2SO_4$ .

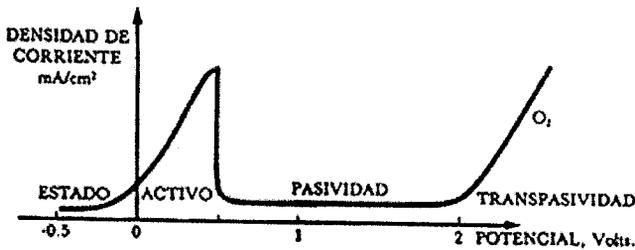


Figura 22.





## IV PROTECCIÓN CONTRA LA CORROSIÓN

Básicamente todos los métodos que existen para lograr controlar la corrosión de los materiales metálicos, son intentos para interferir con el mecanismo de corrosión, de tal manera que se pueda hacer que éste sea lo más ineficiente posible. Por ejemplo, disminuyendo el flujo de electrones entre los componentes metálicos de la celda de corrosión por el aumento de la resistencia eléctrica del metal, de alguna manera disminuiría la corriente de corrosión y, por tanto, la velocidad de corrosión. Esto no es practicable generalmente, pero disminuir el flujo de corriente en el componente electrolítico de la celda de corrosión produciría el mismo efecto, y esto sí es practicable.

Dado que para que exista un proceso de corrosión, debe formarse una pila o celda de corrosión y, por tanto, un ánodo, un cátodo, un conductor metálico y una solución conductora, además de una diferencia de potencial entre los electrodos o zonas anódicas y catódicas, la eliminación de alguno de los componentes esenciales de la mencionada pila, podría llegar a detener el proceso.

En la práctica, existen tres maneras de lograr lo anterior y por tanto de luchar contra la corrosión:

1) Aislamiento eléctrico del material. Esto puede lograrse mediante el empleo de pinturas o resinas, depósitos metálicos de espesor suficiente o por aplicación de recubrimientos diversos.

De esta forma, se puede lograr aislar el metal del contacto directo con el medio agresivo (agua, suelo y atmósfera por lo general).

1) Cambiando el sentido de la corriente en la pila de corrosión.

Conectando eléctricamente, por ejemplo, el acero con un metal más activo (cinc o magnesio) podemos llegar a suprimir la corrosión del acero, ya que dejará de actuar como ánodo y pasará a comportarse como cátodo, dejando el papel de ánodo al metal más activo (cinc o magnesio).

Este es el principio de la protección Catódica.

2) Polarización del mecanismo electroquímico.

Esto se puede lograr bien eliminando el oxígeno disuelto, bien mediante la adición en el medio agresivo de ciertas sustancias llamadas inhibidores, las cuales pueden llegar a polarizar uno de los electrodos de la pila de corrosión y por lo tanto, llegar a detener o cuanto menos disminuir sus efectos. En la práctica, lo anterior conlleva una modificación del entorno o medio ambiente, al cual está expuesto el metal.

Veamos con un poco más de detalle, en qué consisten cada una de las tres maneras propuestas de luchar contra la corrosión.





#### IV.1 RECUBRIMIENTOS PROTECTORES

Estos recubrimientos se utilizan para aislar el metal del medio agresivo. Veamos en primer lugar aquellos recubrimientos metálicos y no-metálicos que se pueden aplicar al metal por proteger, sin una modificación notable de la superficie metálica.

**Recubrimientos no-metálicos:** Podemos incluir dentro de éstos las pinturas, barnices, lacas, resinas naturales o sintéticas. Grasas, ceras, aceites, empleados durante el almacenamiento o transporte de materiales metálicos ya manufacturados y que proporcionan una protección temporal.

**Recubrimientos orgánicos de materiales plásticos:** Esmaltes vitrificados resistentes a la intemperie, al calor y a los ácidos.

**Recubrimientos metálicos:** Pueden lograrse recubrimientos metálicos mediante la electrodeposición de metales como el níquel, cinc, cobre, cadmio, estaño, cromo, etcétera.

**Inmersión en metales fundidos:** Cinc (galvanización en caliente), aluminio (aluminizado), etc.

**Proyección del metal fundido mediante una pistola atomizadora.** Metalizaciones al cinc, aluminio, estaño, plomo, etc.

**Reducción química (sin paso de corriente):** electroles. Por ese procedimiento se pueden lograr depósitos de níquel, cobre, paladio, etc. Recubrimientos formados por modificación química de la superficie del metal. Los llamados recubrimientos de conversión consisten en el tratamiento de la superficie del metal con la consiguiente modificación de la misma. Entre las modificaciones químicas de la superficie del metal podemos distinguir tres tipos principales:

**Recubrimientos de fosfato:** El fosfatado se aplica principalmente al acero, pero también puede realizarse sobre cinc y cadmio. Consiste en tratar al acero en una solución diluida de fosfato de hierro, cinc o manganeso en ácido fosfórico diluido. Los recubrimientos de fosfato proporcionan una protección limitada, pero en cambio resultan ser una base excelente para la pintura posterior.

**Recubrimiento de cromato.** Se pueden efectuar sobre el aluminio y sus aleaciones, magnesio y sus aleaciones, cadmio y cinc. Por lo general, confieren un alto grado de resistencia a la corrosión y son una buena preparación para la aplicación posterior de pintura.

**Recubrimientos producidos por anodizado.** El anodizado es un proceso electrolítico en el cual el metal a tratar se hace anódico en un electrolito conveniente, con el objeto de producir una capa de óxido en su superficie. Este proceso se aplica a varios metales no-ferrosos, pero principalmente al aluminio y a sus aleaciones. Proporciona una buena protección y también resulta un buen tratamiento previo para la pintura posterior.





Podemos incluir también entre los recubrimientos con modificación de la superficie del metal los procesos de cementación. En este proceso, se convierte la superficie externa de la porción metálica que se quiere proteger, en una aleación de alta resistencia a la corrosión. El proceso consiste en calentar la superficie metálica en contacto con polvo de cinc (sherardizado), polvo de aluminio (calorizado) o un compuesto gaseoso de cromo (cromizado). Se obtienen capas de un considerable espesor.

### Propiedades físicas de los recubrimientos metálicos

Refiriéndonos al caso del acero como el material de más amplia utilización, la selección de un determinado recubrimiento metálico se puede efectuar y justificar sobre la base de una de las siguientes propiedades físicas, cuando se trata de proteger de una manera eficaz y económica la superficie del acero en condiciones determinadas:

- ◆ Impermeabilidad, esto es, que el recubrimiento sea continuo y de espesor suficiente, lo cual permitirá aislar la superficie del acero de los agentes agresivos.
- ◆ Resistencia mecánica de los metales utilizados en los recubrimientos, para garantizar una buena resistencia a los choques, rozamientos ligeros o accidentales, etc.
- ◆ Buena adherencia al acero.
- ◆ -Posibilidad de proporcionar superficies pulidas o mates, capaces de conferir a los objetos un acabado con fines decorativos.

Para obtener buenos resultados con los recubrimientos metálicos, hay que tener en cuenta una serie de operaciones que deben llevarse a cabo con anterioridad a la aplicación del recubrimiento.

### Estado de la superficie a proteger. Preparación de la superficie

La limpieza y puesta a punto de la superficie del acero antes de la aplicación de un recubrimiento metálico, son operaciones indispensables, sea cual sea el procedimiento de aplicación escogido. De la calidad de la preparación de la superficie dependerá la adherencia y, en consecuencia, la eficacia de la capa protectora.

Según el estado actual de la superficie por proteger, más o menos oxidada, se puede seleccionar el procedimiento mecánico de limpieza más adecuado, desde el granallado, chorreado de arena, pasando por una limpieza química o electroquímica, como los baños ácidos, con corriente eléctrica o sin ella.

La selección de un recubrimiento está en función de las dimensiones de los objetos y de la extensión de la superficie que se quiere recubrir.

Los procedimientos que se aplican en recintos como hornos, cubas electrolíticas o crisoles, sólo pueden utilizarse para aquellas piezas cuyas dimensiones no están limitadas por su capacidad. Esto es válido para la galvanización, electrólisis, tratamientos térmicos. Por el contrario, la metalización con pistola permite efectuar recubrimientos metálicos independientemente de las dimensiones de la pieza, en razón de la movilidad del equipo.





Por ejemplo, si se trata de hacer un recubrimiento de cinc o cadmio sobre unos tornillos, la operación se puede realizar mediante una electrólisis. Para proteger un bote de acero con un recubrimiento de cinc, se puede recurrir a la galvanización en caliente. En fin, si se trata de proteger una obra de arte o la puerta de una esclusa, se debe recurrir al cinc proyectado por una pistola de metalización.

Tanto la naturaleza como el espesor del metal protector son función de muchos parámetros, entre los cuales uno de los más importantes es el precio. Asimismo, es muy importante conocer con la mayor precisión posible el medio ambiente al cual va a estar sometida la pieza. En lo que concierne a los medios naturales, debe conocerse si es posible si se trata de una atmósfera exterior (y en este caso es de mucha ayuda conocer el tipo de atmósfera: rural, urbana, industrial, marina, etc.) o interior (climatizada, con calefacción, etc.).

Para los entornos diferentes a los naturales, es preciso conocer la mayor información posible sobre la composición química del medio, impurezas eventuales, estado físico, temperatura, etc. Por ejemplo, los recubrimientos de cinc aguantan el contacto con soluciones de pH comprendido entre 6 y 11; los recubrimientos de estaño son convenientes en contacto con ciertos productos alimenticios, etc.

### Procedimientos de aplicación

Los procedimientos más comúnmente empleados en la práctica para obtener recubrimientos metálicos sobre el acero son:

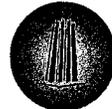
- ◆ inmersión en un metal
- ◆ metalización por proyección con pistola
- ◆ electrólisis
- ◆ tratamientos termoquímicos de difusión
- ◆ placado

Los procedimientos de aplicación son de suma importancia en cuanto a la eficacia de la protección contra la corrosión, pues tanto el espesor, porosidad, como la naturaleza misma de las capas obtenidas son función del procedimiento de aplicación. Así, por ejemplo, los recubrimientos electrolíticos que tienen espesores de algunos micrones, se reservan generalmente para su utilización en medio poco agresivo. En cambio, los recubrimientos obtenidos por inmersión en un metal fundido tienen espesores mayores.

Los recubrimientos obtenidos mediante proyección permiten obtener espesores más grandes y perfectamente controlables. Se utilizan especialmente en condiciones severas de corrosión.

El placado del acero permite asociar a la calidad mecánica del soporte, la resistencia a la corrosión del recubrimiento.

La selección entre los diferentes procedimientos de aplicación de los recubrimientos metálicos se realiza, pues, siguiendo criterios tales como: el espesor de protección, dimensión de las piezas, agresividad del medio, duración prevista, etc. Muy brevemente vamos a describir cada uno de los procedimientos citados.





### **Inmersión en un metal en fusión**

Después de una adecuada preparación superficial (un decapado ácido por ejemplo), las piezas de acero se sumergen momentáneamente en un baño de un metal en fusión. Esta operación puede realizarse para una sola pieza o para un conjunto, o también en continuo para productos siderúrgicos como tuberías láminas, trefilados, etc. Tal técnica se utiliza habitualmente para los recubrimientos de cinc (galvanización en caliente), aluminio (aluminizado), estaño y plomo.

Después del enfriamiento, las piezas ya recubiertas pueden someterse a un tratamiento complementario de pasivación en ciertos casos.

#### *Metalización por proyección con pistola*

Esta técnica consiste en proyectar sobre la superficie del acero, ya preparada en unas condiciones especiales (por chorreado con arena o granallado), un metal en estado de fusión por medio de una pistola.

El espesor del recubrimiento se puede controlar fácilmente por el operador y puede variar según la naturaleza del metal proyectado y el resultado que se espera obtener. La mayoría de los metales o aleaciones pueden aplicarse de esta manera: cinc, aluminio, acero inoxidable, estaño, plomo, níquel, cobre, etc.

### **Electrólisis**

Después de una cuidadosa preparación superficial que incluye un decapado ácido, seguido de neutralización y lavado, las piezas por tratar se sumergen en soluciones que contienen sales de los metales a depositar. Las piezas se colocan en posición catódica, conectadas al polo negativo de un generador. Bajo la acción de la corriente eléctrica proporcionada por el generador, el acero se recubre del metal contenido en el baño o bien puede ser suministrado por un ánodo soluble del metal en cuestión.

Los metales corrientemente depositados por vía electroquímica son: cromo, cobre, níquel, cinc, cadmio y estaño. Los depósitos obtenidos son por lo general de espesor pequeño (2 a 30 micrones).

### **Tratamientos termoquímicos de difusión**

Los tratamientos termoquímicos de difusión, también conocidos como cementación, consisten en colocar las piezas de acero a tratar en una mezcla de polvo metálico y de enlazante (cemento) en un recinto a alta temperatura. El metal protector (recubrimiento) se difunde superficialmente en el metal base y forma una capa eficaz contra la corrosión. Los metales corrientemente aplicados por este método son el cinc (sherardización) y el aluminio.





### Placado

Después de un tratamiento superficial especial, la lámina del metal para aplicar y el metal base se someten a un proceso de colaminación en caliente, obteniéndose al final lámina de acero recubierta del metal aplicado. Este proceso puede efectuarse sobre una o las dos caras de la lámina del acero. El acero inoxidable, níquel, monel y el cobre se aplican comúnmente por esta técnica.

## IV.2 PROTECCIÓN CATÓDICA

La corrosión suele ser un fenómeno electroquímico por lo que se puede intentar combatirlo conectando el metal que se quiere proteger a otro metal menos noble, según la serie galvánica, que actuará entonces como ánodo de sacrificio (también llamado galvánico) o bien conectándolo al polo negativo de una fuente exterior de corriente continua.

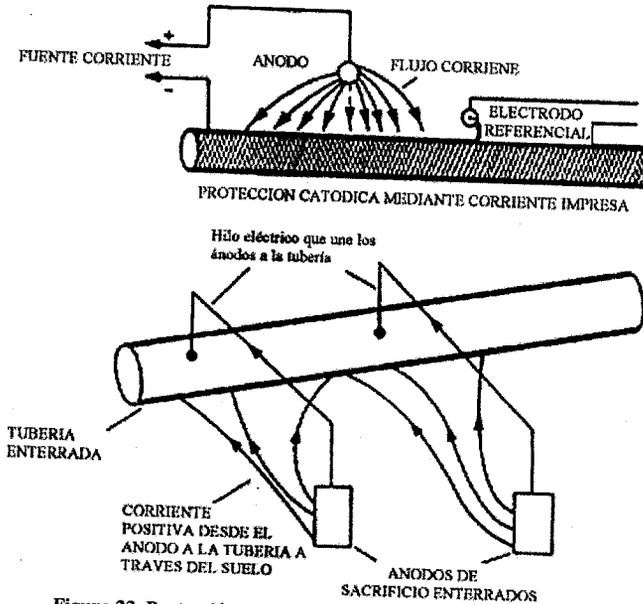
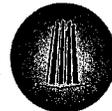


Figura 23. Protección catódica mediante ánodos de sacrificio.

El primer caso constituye la protección catódica con ánodos galvánicos o de sacrificio y el segundo la protección catódica con corriente impresa. La protección catódica constituye sin duda, el más importante de todos los métodos empleados para prevenir la corrosión de estructuras metálicas enterradas en el suelo o sumergidas en medios acuosos.





Tanto el acero como el cobre, plomo y bronce son algunos de los metales que pueden ser protegidos de la corrosión por este método. Las aplicaciones incluyen barcos, tuberías, tanques de almacenamiento, puentes, etc. La protección se logra aplicando una corriente externa a partir de un rectificador que suministra corriente continua de bajo voltaje. El terminal positivo de la fuente de corriente se conecta a un ánodo auxiliar (grafito por ejemplo) localizado a una determinada distancia de la estructura a proteger y el terminal negativo se conecta a la estructura metálica.

En la práctica, la corriente necesaria para proteger una estructura desnuda suele ser demasiado grande como para ser rentable económicamente. La estructura entonces, se recubre con algún revestimiento para proporcionarle protección frente al medio agresivo, reservándose la protección catódica para proteger la estructura sólo en aquellos puntos en que no pueda lograrlo el revestimiento.

Una estructura también puede protegerse contra la corrosión mediante un ánodo galvánico o de sacrificio. Si el electrodo auxiliar es de un metal más activo que el metal que se quiere proteger, actuará de ánodo en la celda de corrosión. En este caso, la estructura actuará como cátodo y quedará protegida por el "sacrificio" del ánodo que se corroerá.

Este otro método de proteger catódicamente una estructura se utiliza cuando resulta inconveniente una fuente externa de corriente. Esencialmente, el ánodo de sacrificio (de magnesio, aleaciones base de magnesio, cinc y aluminio) suministra la energía eléctrica necesaria para la protección de la estructura.

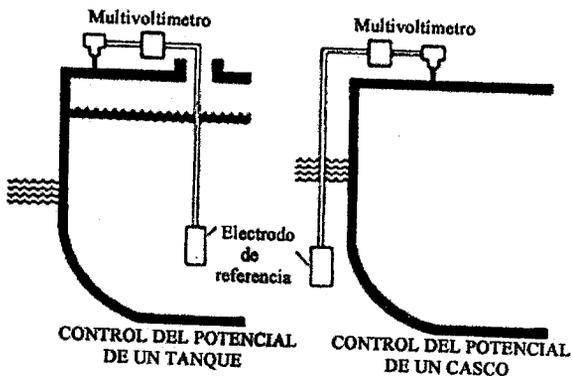
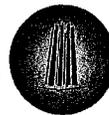
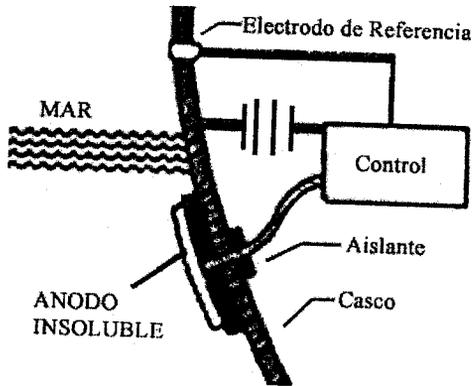


Figura 24.

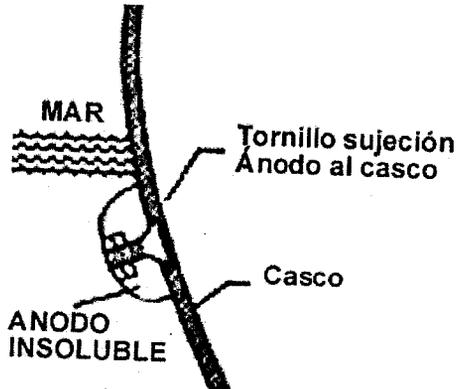
En un montaje de protección catódica conviene comprobar periódicamente la buena marcha del sistema de protección, lo cual se realiza con ayuda de un electrodo de referencia y un milivoltímetro. Los electrodos de referencia más empleados son el de plata/cloruro de plata ( $Ag/AgCl$ ) y el de cobre/sulfato de cobre ( $Cu/CuSO_4$ )

Los esquemas de la figura muestran como hacerlo en el caso de control del casco de un barco o de una cisterna de un petrolero.





a)



b)

Figura 25. Protección catódica del casco de un barco. a) Mediante corriente impresa, b) mediante ánodos de sacrificio.

### Aplicaciones prácticas de la protección catódica

Protección catódica de depósitos de agua dulce. Los depósitos de agua potable, tanto industriales como domésticos, también se pueden proteger de la corrosión mediante protección catódica. En este caso se prefiere el sistema de ánodos galvánicos o de sacrificio. En la figura 26 se ilustra la protección de un tanque de agua potable con ayuda de un ánodo de sacrificio.



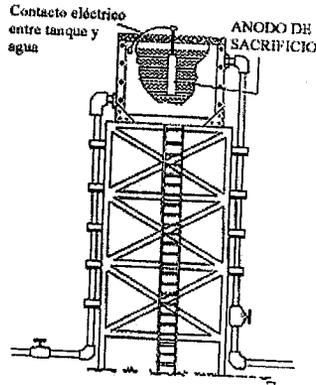


Figura 26. Esquema de protección catódica con ánodo de sacrificio de un tanque de agua.

Protección catódica de tuberías enterradas. Quizá uno de los casos donde es más empleada la protección catódica es en las tuberías enterradas. Los miles y miles de kilómetros de tuberías enterradas que se utilizan para transportar agua o petróleo están protegidos por lo general mediante tratamiento catódico, además de determinados revestimientos, cuando el caso lo requiere. Básicamente, se determina la resistencia del suelo para identificar aquellos lugares en los cuales, cuando tal resistencia es baja es indicio de posibilidad de corrosión.

En la figura se representa el esquema de un montaje de protección catódica de una tubería con ánodos de sacrificio, comúnmente empleado en la práctica. Se citan estos ejemplos, como algunas de las aplicaciones más frecuentes de la protección catódica. Ahora bien, su campo es mucho más amplio ya que, en general, por este procedimiento se pueden proteger los metales que están en contacto con medios conductores agresivos.

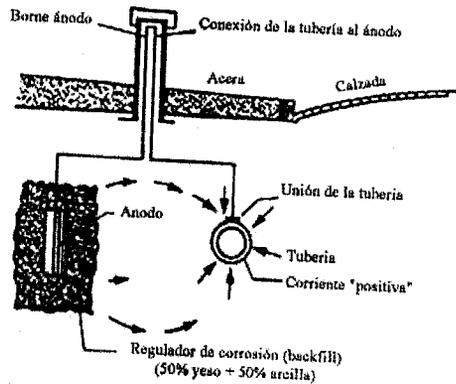


Figura 27. Protección de una tubería enterrada con ánodo de sacrificio.





### IV.3 LOS INHIBIDORES DE LA CORROSIÓN

Los inhibidores son sustancias químicas que protegen al metal contra el ataque electroquímico de soluciones agresivas. Son usados ampliamente por la industria para modificar el comportamiento de las aguas, a efectos de un mejor control de la corrosión.

El principio del funcionamiento de los inhibidores es formar en la superficie misma de los electrodos de la pila causante de la corrosión, sea un compuesto insoluble, sea la fijación de una determinada materia orgánica, con el objeto de polarizar la pila de corrosión.

El comportamiento de los inhibidores puede ser muchas veces peligroso, ya que en función de la concentración o de las circunstancias, pueden jugar tanto el papel de inhibidores como de estimuladores de la corrosión.

Los hay de dos tipos, aunque a veces se utiliza una combinación de ambos: —inhibidores anódicos— hidróxido sódico, carbonato, silicato y barato de sodio, ciertos fosfatos, cromato sódico, nitrito y benzoato de sodio, etc; —inhibidores catódicos— sulfato de cinc, sulfato de magnesio, bicarbonato de calcio, etc.

La disolución del acero en aguas de pH neutro tiene lugar en ánodos asociados con defectos en la capa superficial del óxido formado sobre el acero. En cambio, la reacción catódica puede ocurrir en cualquier lugar de la superficie. La combinación de ánodos muy pequeños y una gran superficie catódica, conduce a la llamada corrosión localizada (picaduras). Los inhibidores anódicos actúan formando un compuesto insoluble (óxido férrico), el cual precipita en los lugares anódicos, evitando la reacción anódica y por tanto, inhibiendo todavía más la corrosión.

Los inhibidores catódicos, en cambio, actúan sobre toda la superficie y son menos eficaces. Reducen la corrosión mediante la formación de una capa o película de alta resistencia eléctrica sobre la superficie, la cual funciona como una barrera para la corriente de corrosión.

Uno de los principales problemas de los inhibidores anódicos es que tienen que estar presentes en una concentración suficiente, con el objeto de asegurar que cualquier posible defecto en la película de óxido será cubierto, ya que, de lo contrario puede ocurrir una corrosión por picaduras (localizada) muy intensa. Este riesgo se puede minimizar utilizando los llamados sistemas de inhibidores de efecto sinérgico, los cuales, básicamente, son mezclas de inhibidores anódicos y catódicos. El constituyente catódico disminuye la velocidad de corrosión y así permite al constituyente anódico "sellar" la capa de óxido con una concentración mucho menor que si estuviera actuando solo. Actualmente, los sistemas de inhibidores que se están empleando para el control de la corrosión de aguas son de este tipo, por ejemplo, el sistema cromato/polifosfato de cinc. En los medios ácidos, los cuales disuelven la película superficial protectora de óxido formada sobre el acero, los inhibidores anteriores, obviamente, no tienen efecto. En este caso se emplean los llamados inhibidores de adsorción específica —moléculas orgánicas— que aíslan el metal del medio ácido, protegiendo la superficie por adsorción. Algunos inhibidores de adsorción actúan predominantemente sobre la reacción anódica, mientras otros lo hacen sobre la catódica.





Hay que tener muy presente cuando se emplean estos inhibidores que los procesos de adsorción, muy a menudo son muy específicos y están afectados por muchos factores, como la temperatura, la velocidad de flujo del medio y las impurezas presentes en la superficie metálica. Todos estos factores deben ser evaluados cuidadosamente, antes de recomendar el uso de un inhibidor de adsorción.

El empleo de los inhibidores de la corrosión, entra dentro del control de ésta por modificación del medio ambiente. Los ambientes más comunes asociados con la corrosión son de tres tipos: aguas, la atmósfera y los suelos.

En el caso del agua hay que tener en cuenta todos los aspectos de la composición de ésta. Todas las aguas que están en contacto con metales, tanto en los procesos industriales como de otra naturaleza, provienen sea del agua de mar, sea del agua de lluvia. Por tanto, puede haber una gran variación en su composición química.

El principal método de tratamiento de aguas para control de la corrosión es la eliminación del oxígeno disuelto, junto con la adición de inhibidores. La presencia de oxígeno disuelto en el agua acelera la reacción catódica y, consecuentemente, la velocidad de corrosión aumenta en proporción a la cantidad de oxígeno disponible en el cátodo.

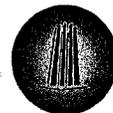
La eliminación tanto del oxígeno disuelto como del anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) de las aguas, antes de su uso, constituye un camino importante para el control de la corrosión no sólo del hierro y acero, sino también del cobre, bronce, cinc y plomo. El oxígeno puede ser eliminado por medios físicos de aireación o químicos de activación.

La de-aireación se puede llevar a cabo subiendo la temperatura, bajando la presión o purgando el agua por paso de un gas inerte.

La de-activación química se realiza por tratamiento del agua con hidrazina o sulfito sódico.

Por lo que se refiere a la atmósfera hay que tener en cuenta que la corrosión depende fundamentalmente de dos factores: la presencia de contaminantes (partículas sólidas en suspensión, impurezas gaseosas como el anhídrido sulfuroso,  $\text{SO}_2$ ) y el contenido de humedad del aire.

La humedad relativa es muy importante al considerar los problemas relacionados con la corrosión atmosférica. El hierro libre de óxido no desarrolla la herrumbre en aquellas atmósferas cuya humedad relativa es del 70% o menor. En general, para cualquier metal que se pueda corroer en la atmósfera, hay un valor crítico de la humedad relativa, por debajo del cual no se corroe. Este valor crítico de la humedad está determinado grandemente por la naturaleza higroscópica de algún contaminante sólido que pueda estar presente y por la del producto o productos de corrosión formados. De aquí la gran influencia ejercida por los contaminantes atmosféricos.





Los métodos de control más efectivos para minimizar la corrosión atmosférica tendrían que ver con la modificación de la atmósfera, eliminando los contaminantes, particularmente el  $\text{SO}_2$ . Esto no puede realizarse en el exterior y debe recurrirse a la protección de las estructuras y equipos sometidos a la intemperie, por alguno de los métodos citados anteriormente (pinturas, recubrimientos metálicos, etc.).

La corrosión en los suelos se parece en muchos aspectos a la corrosión por las aguas. En ambos casos, el electrolito contiene sustancias disueltas que alteran su comportamiento. La corrosión de un suelo puede cambiar de un área a otra por simple cambio de composición. Los principales factores que determinan cuándo un suelo es susceptible de ser agresivo con respecto a una estructura metálica enterrada son: la humedad, el acceso de oxígeno (aireación), conductividad eléctrica (la cual está influenciada por la presencia de sales disueltas) y el pH del suelo. No hay que olvidar que muchos problemas de corrosión de metales enterrados provienen de las llamadas corrientes eléctricas parásitas o vagabundas, producidas por ejemplo por los trenes eléctricos.

Como ya se ha indicado, el método más utilizado para prevenir la corrosión de metales o estructuras enterradas es la protección catódica, junto con un adecuado revestimiento (tela asfáltica por ejemplo).

### Selección de materiales en medios agresivos

El control de la corrosión es sólo uno de los muchos factores que intervienen en la selección de un material. El ingeniero de materiales al efectuar una determinada selección debe tener en cuenta una serie de factores, como propiedades físicas y mecánicas del material, resistencia a la corrosión, disponibilidad, facilidad de trabajo, etc., además de los aspectos económicos, antes que pensar en el material en sí mismo. La selección debería realizarse en base al material más económico, pero que reuniera la combinación de propiedades necesarias para el uso que se le va a dar.

Las consideraciones económicas son muy importantes, así como el tiempo de vida esperado para el equipo e instalación. No se trata, por ejemplo, de esperar un material más barato, si el costo de la demora puede llegar a ser mayor que el de un material más caro, pero del que se tiene una disponibilidad inmediata. Tampoco se trata de seleccionar un material muy resistente a la corrosión, y por lo general muy caro, que supere largamente la duración prevista para el equipo. Lo mismo puede aplicarse en el caso de los recubrimientos.

Tanto el diseño como el mantenimiento planificado deben ser tenidos muy en cuenta a la hora de realizar la selección de un material con miras a un buen control de la corrosión.



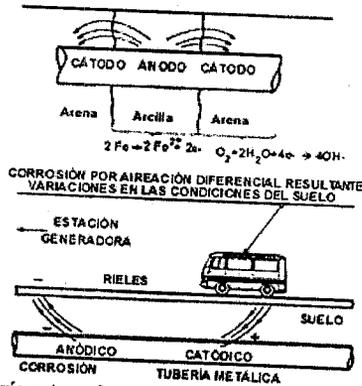


Figura 28. Corrosión de una tubería enterrada causada por corrientes eléctricas parásitas producidas por un tranvía.

El control de la corrosión debe realizarse, siempre que sea posible, desde la etapa misma del diseño del componente o de la planta. Evitar dentro de las limitaciones del propio diseño la formación de huecos o cavidades en los cuales pueda quedar atrapada el agua, eliminar el contacto directo de metales disímiles (pares galvánicos), así como proporcionar un acceso fácil para un posterior y planificado mantenimiento por pintura durante el servicio, por ejemplo, constituyen alguna de las normas de buena práctica que ayudarán a un mejor control de la corrosión.

### Tipos de materiales disponibles

Ya que la corrosión es un proceso electroquímico, un camino evidente para evitarla es el empleo de materiales químicamente resistentes. Plásticos, cerámicas, vidrios, gomas, asbesto y cemento entran dentro de esta categoría. El problema es que en muchos casos no tienen o no reúnen aquellas otras propiedades —diferentes a la resistencia a la corrosión— como para satisfacer los requerimientos de servicio.

Los metales difieren mucho en cuanto a su resistencia a la corrosión. Por ejemplo, los metales nobles como el platino y el oro son inherentemente resistentes a muchos medios agresivos; el cromo y el titanio tienen una buena resistencia a la corrosión; el acero, el cinc y el magnesio se corroen fácilmente. La resistencia a la corrosión "intrínseca" de un metal depende de muchos factores, incluyendo su posición en la serie galvánica, así como la adherencia y compacidad de la película formada en su superficie en contacto con el aire o el medio de servicio. Con una película de óxido protectora, el material se comporta como un metal noble, en el supuesto de que exista suficiente oxígeno en el medio como para reparar los defectos en la película, a medida que se formen.



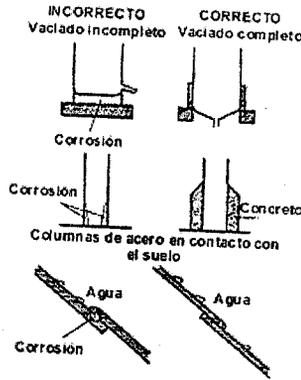


Figura 29. Diseños "geométricos" que pueden contribuir a evitar la corrosión.

El objetivo en último término, consiste en seleccionar el material más económico compatible con las demandas y especificaciones de la aplicación en particular.

Aparte de la resistencia a la corrosión, la selección obvia para muchas aplicaciones es un acero al carbono. El acero tiene una resistencia "intrínseca" a la corrosión pequeña, pero aleándolo se tiene el medio de combinar lo económico del acero con la intrínsecamente alta resistencia a la corrosión de metales relativamente costosos, como el cromo.

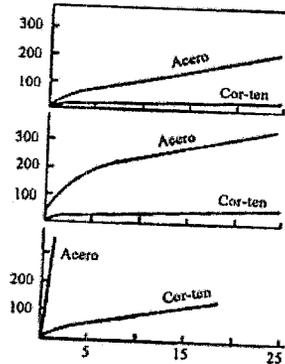


Figura 30. Efecto de pequeñas adiciones de aleantes en la resistencia del acero a la corrosión atmosférica. El acero Cor-ten (acero patinable) contiene 2-3% de aleantes, particularmente cobre, cromo, fósforo.





Añadiendo cuanto menos un 0.2% de cobre a un acero al carbono se aumenta considerablemente su resistencia a la corrosión atmosférica, transformando la herrumbre en un producto más compacto y adherente.

El cromo, aluminio, titanio, silicio, tungsteno y molibdeno forman películas de óxidos protectores y sus aleaciones están similarmente protegidas.

El níquel también forma aleaciones con una buena resistencia a la corrosión en medios ácidos, incluso cuando el contenido de oxígeno del medio es bajo.

Veamos algunos de los tipos más comunes de aleaciones resistentes a la corrosión utilizados en la práctica.

### **Aceros inoxidables**

Existen tres tipos principales. Los aceros inoxidables martensítico y ferrítico contienen entre un 11 y un 18% de cromo. El acero inoxidable austenítico contiene aproximadamente entre un 16 a 27% de cromo y de un 8 a 22% de níquel. La resistencia más elevada a la corrosión se logra con el acero inoxidable austenítico.

Los aceros inoxidables mejoran sus características de resistencia a la corrosión en medios oxidantes o de buena aireación, que aseguran el mantenimiento de su película protectora superficial, pero están sujetos a corrosión por picaduras, por hendiduras y corrosión bajo tensión en ciertos medios específicos, y son resistentes a la corrosión atmosférica, ácido nítrico, algunas concentraciones de ácido sulfúrico y muchos ácidos orgánicos.

### **Aleaciones de cobre**

El cobre es resistente en agua de mar, agua corriente fría o caliente, ácidos deareados y no-oxidantes y al ataque atmosférico.

Ciertos elementos aleantes mejoran sus propiedades físicas y mecánicas y también su resistencia a la corrosión. De aquí la utilización de los bronce de aluminio y de las aleaciones cobre-níquel para los tubos de los condensadores. Los bronce de aluminio también se emplean para la construcción de los cuerpos de las bombas y de las hélices de los barcos.

### **Aleaciones de aluminio**

El aluminio ofrece una buena resistencia a la corrosión atmosférica y a muchos otros medios agresivos, como por ejemplo: ácido acético, ácido nítrico ácidos grasos, atmósferas sulfurosas, etc. Se fabrican aleaciones de aluminio con pequeñas adiciones de otros metales, principalmente con el objeto de mejorar sus propiedades mecánicas y físicas las aleaciones aluminio—magnesio y aluminio—manganeso son las que presentan una mayor resistencia a la corrosión, seguidas por las aleaciones de aluminio—magnesio—silicio y aluminio—silicio. En cambio las aleaciones de aluminio que contienen cobre son las que presentan menor resistencia a la corrosión.





### **Aleaciones de níquel**

El níquel es resistente a los álcalis en frío y caliente, ácidos orgánicos y ácidos inorgánicos no oxidantes diluidos, así como a la atmósfera. La adición de cobre mejora su resistencia a la corrosión en los medios reductores y en el agua de mar.

El cromo aumenta su resistencia a la corrosión en los medios oxidantes. La presencia de molibdeno como aleante también aumenta la resistencia en condiciones reductoras. La adición de cobre y molibdeno mejora la resistencia a la corrosión tanto en medios reductores como oxidantes.

### **Aleaciones de titanio**

El titanio y sus aleaciones tienen una gran resistencia a la corrosión en agua de mar y en atmósferas industriales, de tal manera que no necesitan protección. También se pueden utilizar con buenas garantías en las plantas químicas.





## V. PROTECCIÓN CATÓDICA

### V.1.1 INTRODUCCIÓN

Se entiende por **corrosión** la interacción de un metal con el medio que lo rodea, produciendo el consiguiente deterioro en sus propiedades tanto físicas como químicas. Las características fundamentales de este fenómeno, es que sólo ocurre en presencia de un electrólito, ocasionando regiones plenamente identificadas, llamadas estas **anódicas** y **catódicas**: una reacción de oxidación es una reacción anódica, en la cual los electrones son liberados dirigiéndose a otras regiones catódicas. En la región anódica se producirá la disolución del metal (corrosión) y, consecuentemente en la región catódica la inmunidad del metal.

Este mecanismo que es analizado desde un punto de vista termodinámico electroquímico, indica que el metal tiende a retornar al estado primitivo o de mínima energía, siendo la corrosión por lo tanto la causante de grandes perjuicios económicos en instalaciones enterradas. Por esta razón, es necesario la oportuna utilización de la técnica de **protección catódica**.

Se designa químicamente **corrosión por suelos**, a los procesos de degradación que son observados en estructuras enterradas. La intensidad dependerá de varios factores tales como el contenido de humedad, composición química, pH del suelo, etc. En la práctica suele utilizarse comúnmente el valor de la **resistividad eléctrica** del suelo como índice de su agresividad; por ejemplo un terreno muy agresivo, caracterizado por presencia de iones tales como cloruros, tendrán resistividades bajas, por la alta facilidad de transportación iónica.

La protección catódica es un método electroquímico cada vez más utilizado hoy en día, el cual aprovecha el mismo principio electroquímico de la corrosión, transportando un gran cátodo a una estructura metálica, ya sea que se encuentre enterrada o sumergida. Para este fin será necesario la utilización de fuentes de energía externa mediante el empleo de ánodos galvánicos, que difunden la corriente suministrada por un transformador-rectificador de corriente.

El mecanismo, consecuentemente implicará una migración de electrones hacia el metal a proteger, los mismos que viajarán desde ánodos externos que estarán ubicados en sitios plenamente identificados, cumpliendo así su función

A esta protección se debe agregar la ofrecida por los revestimientos, como por ejemplo las pinturas, casi la totalidad de los revestimientos utilizados en instalaciones enterradas, aéreas o sumergidas, son pinturas industriales de origen orgánico, pues el diseño mediante ánodo galvánico requiere del cálculo de algunos parámetros, que son importantes para proteger estos materiales, como son: la corriente eléctrica de protección necesaria, la resistividad eléctrica del medio electrólito, la densidad de corriente, el número de ánodos y la resistencia eléctrica que finalmente ejercen influencia en los resultados.





## V.1.2 PROTECCIÓN CATÓDICA

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión, que está siendo aplicada cada día con mayor éxito en el mundo entero, en que cada día se hacen necesarias nuevas instalaciones de ductos para transportar petróleo, productos terminados, agua; así como para tanques de almacenamientos, cables eléctricos y telefónicos enterrados y otras instalaciones importantes.

En la práctica se puede aplicar protección catódica en metales como acero, cobre, plomo, latón, y aluminio; contra la corrosión en todos los suelos y, en casi todos los medios acuosos. De igual manera, se puede eliminar el agrietamiento por corrosión bajo tensiones por corrosión, corrosión intergranular, picaduras o tanques generalizados.

Como condición fundamental las estructuras componentes del objeto a proteger y del elemento de sacrificio o ayuda, deben mantenerse en contacto eléctrico e inmerso en un electrolito.

Aproximadamente la protección catódica presenta sus primeros avances, en el año 1824, en que Sir. Humphrey Davy, recomienda la protección del cobre de las embarcaciones, uniéndolo con hierro o zinc; habiéndose obtenido una apreciable reducción del ataque al cobre, a pesar de que se presentó el problema de ensuciamiento por la proliferación de organismos marinos, habiéndose rechazado el sistema por problemas de navegación.

En 1850 y después de un largo período de estacamiento la marina Canadiense mediante un empleo adecuado de pinturas con antiorganismos y anticorrosivos demostró que era factible la protección catódica de embarcaciones con mucha economía en los costos y en el mantenimiento.

## V.1.3 FUNDAMENTO DE LA PROTECCION CATODICA

Luego de analizadas algunas condiciones especialmente desde el punto de vista electroquímico dando como resultado la realidad física de la corrosión, después de estudiar la existencia y comportamiento de áreas específicas como **Anodo-Cátodo-Electrólito** y el mecanismo mismo de movimiento de electrones e iones, llega a ser obvio que si cada fracción del metal expuesto de una tubería o una estructura construida de tal forma de coleccionar corriente, dicha estructura no se corroerá porque sería un cátodo.

La protección catódica realiza exactamente lo expuesto forzando la corriente de una fuente externa, sobre toda la superficie de la estructura.

Mientras que la cantidad de corriente que fluye, sea ajustada apropiadamente venciendo la corriente de corrosión y, descargándose desde todas las áreas anódicas, existirá un flujo neto de corriente sobre la superficie, llegando a ser toda la superficie un cátodo.





Para que la corriente sea forzada sobre la estructura, es necesario que la diferencia de potencial del sistema aplicado sea mayor que la diferencia de potencial de las microceldas de corrosión originales.

La protección catódica funciona gracias a la descarga de corriente desde una cama de ánodos hacia tierra y dichos materiales están sujetos a corrosión, por lo que es deseable que dichos materiales se desgasten (se corroan) a menores velocidades que los materiales que protegemos.

Teóricamente, se establece que el mecanismo consiste en polarizar el cátodo, llevándolo mediante el empleo de una corriente externa, más allá del potencial de corrosión, hasta alcanzar por lo menos el potencial del ánodo en circuito abierto, adquiriendo ambos el mismo potencial eliminándose la corrosión del sitio, por lo que se considera que la protección catódica es una técnica de **POLOARIZACIÓN CATÓDICA**.

La protección catódica no elimina la corrosión, éste remueve la corrosión de la estructura a ser protegida y la concentra en un punto donde se descarga la corriente.

Para su funcionamiento práctico requiere de un electrodo auxiliar (ánodo), una fuente de corriente continua cuyo terminal positivo se conecta al electrodo auxiliar y el terminal negativo a la estructura a proteger, fluyendo la corriente desde el electrodo a través del electrolito llegando a la estructura.

Influyen en los detalles de diseño y construcción parámetro de geometría y tamaño de la estructura y de los ánodos, la resistividad del medio electrolito, la fuente de corriente, etc.

#### **V.1.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO PARA LA PROTECCION CATODICA EN TUBERIAS ENTERRADAS**

La proyección de un sistema de protección catódica requiere de la investigación de características respecto a la estructura a proteger, y al medio.

#### **RESPECTO A LA ESTRUCTURA A PROTEGER**

- a. Material de la estructura;
- b. Especificaciones y propiedades del revestimiento protector (si existe);
- c. Características de construcción y dimensiones geométricas;
- d. Mapas, planos de localización, diseño y detalles de construcción;
- e. Localización y características de otras estructuras metálicas, enterradas o sumergidas en las proximidades;





- f. Información referente a los sistemas de protección catódica, los característicos sistemas de operación, aplicados en las estructuras aledañas;
- g. Análisis de condiciones de operación de líneas de transmisión eléctrica en alta tensión, que se mantengan en paralelo o se crucen con las estructuras enterradas y puedan causar inducción de la corriente;
- h. Información sobre todas las fuentes de corriente continua, en las proximidades y pueden originar corrosión;
- i. Sondeo de las fuentes de corriente alterna de baja y media tensión, que podrían alimentar rectificadores de corriente o condiciones mínimas para la utilización de fuentes alternas de energía;

### RESPECTO AL MEDIO

Luego de disponer de la información anterior, el diseño será factible complementando la información con las mediciones de las características campo como:

- a. Mediciones de la resistividad eléctrica a fin de evaluar las condiciones de corrosión a que estará sometida la estructura.

Definir sobre el tipo de sistema a utilizar; galvánico o corriente impresa y, escoger los mejores lugares para la instalación de ánodos;

- b. Mediciones del potencial Estructura-Electrólito, para evaluar las condiciones de corrosividad en la estructura, así mismo, detectar los problemas de corrosión electrolítica;
- c. Determinación de los lugares para la instalación de ánodo bajo los siguientes principios:
  - Lugares de baja resistividad.
  - Distribución de la corriente sobre la estructura.
  - Accesibilidad a los sitios para montaje e inspección
- d. Pruebas para la determinación de corriente necesaria; mediante la inyección de corriente a la estructura bajo estudio con auxilio de una fuente de corriente continua y una cama de ánodos provisional. La intensidad requerida dividida para área, permitirá obtener la densidad requerida para el cálculo.





## V.2 SISTEMAS PARA PROTECCIÓN CATÓDICA

### V.2.1 ÁNODO GALVANICO

Se fundamenta en el mismo principio de la corrosión galvánica, en la que un metal más activo es anódico con respecto a otro más noble, corroidéndose el metal anódico.

En la protección catódica con ánodo galvánico, se utilizan metales fuertemente anódicos conectados a la tubería a proteger, dando origen al sacrificio de dichos metales por corrosión, descargando suficiente corriente, para la protección de la tubería.

La diferencia de potencial existente entre el metal anódico y la tubería a proteger, es de bajo valor porque este sistema se usa para pequeños requerimientos de corriente, pequeñas estructuras y en medio de baja resistividad.

### V.2.2 CARACTERÍSTICAS DE UN ANODO DE SACRIFICIO

- a. Debe tener un potencial de disolución lo suficientemente negativo, para polarizar la estructura de acero (metal que normalmente se protege) a  $-0.8$  V. Sin embargo el potencial no debe de ser excesivamente negativo, ya que eso motivaría un gasto superior, con un innecesario paso de corriente. El potencial práctico de disolución puede estar comprendido entre  $-0.95$  a  $-1.7$  V;
- b. Corriente suficientemente elevada, por unidad de peso de material consumido;
- c. Buen comportamiento de polarización anódica a través del tiempo;
- d. Bajo costo.

### V.2.3 TIPOS DE ÁNODOS

Considerando que el flujo de corriente se origina en la diferencia de potencial existente entre el metal a proteger y el ánodo, éste último deberá ocupar una posición más elevada en la tabla de potencias (serie electroquímica o serie galvánica).

Los ánodos galvánicos que con mayor frecuencia se utilizan en la protección catódica son: Magnesio, Zinc, Aluminio.

- ◆ **Magnesio:** Los ánodos de Magnesio tienen un alto potencial con respecto al hierro y están libres de pasivación. Están diseñados para obtener el máximo rendimiento posible, en su función de protección catódica.

Los ánodos de Magnesio son apropiados para oleoductos, pozos, tanques de almacenamiento de agua, incluso para cualquier estructura que requiera protección catódica temporal.

Se utilizan en estructuras metálicas enterradas en suelo de baja resistividad hasta  $3000$  ohm-cm.





- ◆ **Zin:** Para estructura metálica inmersas en agua de mar o en suelo con resistividad eléctrica de hasta 1000 ohm-cm
- ◆ **Aluminio:** Para estructuras inmersas en agua de mar.

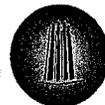
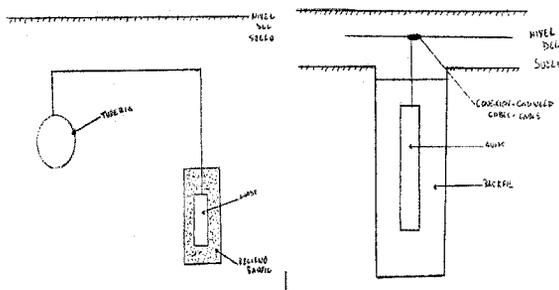
#### V.2.4 RELLENO BACKFILL

Para mejorar las condiciones de operación de los ánodos en sistemas enterrados, se utilizan algunos rellenos entre ellos el de **Backfill** especialmente con ánodos de Zinc y Magnesio, estos productos químicos rodean completamente el ánodo produciendo algunos beneficios como:

- a. Promover mayor eficiencia;
- b. Desgaste homogéneo del ánodo;
- c. Evita efectos negativos de los elementos del suelo sobre el ánodo;
- d. Absorben humedad del suelo manteniendo dicha humedad permanente.

La composición típica del Backfill para ánodos galvánicos está constituida por yeso ( $\text{CaSO}_4$ ), bentonita, sulfato de sodio, y la resistividad de la mezcla varía entre 50 a 250 ohm-cm.

#### V.2.5 DISEÑO DE INSTALACIÓN PARA ÁNODO GALVANICO





## V.2.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS ANODOS GALVANICOS

	ANODO ZINC	ANODO MAGNESIO	ANODO ALUMINIO
EFICIENCIA	95%	50%	95%
RENDIMIENTO AM-HR/KG	778	1102	2817
CONTENIDO DE ENERGIA AM-HR/KG	820	2204	2965
POTENCIAL DE TRABAJO (VOLTIO)	-1.10	-1.45 A 1.70	-1.10
RELLENO	50% YESO 50% BENTONITA	75% YESO, 20% BENTONITA, 5%SO <sub>4</sub> Na <sub>2</sub>	

## V.2.7 CORRIENTE IMPRESA

En este sistema se mantiene el mismo principio fundamental, pero tomando en cuenta las limitaciones del material, costo y diferencia de potencial con los ánodos de sacrificio, se ha ideado este sistema mediante el cual el flujo de corriente requerido, se origina en una fuente de corriente generadora continua regulable o, simplemente se hace uso de los rectificadores, que alimentados por corriente alterna ofrecen una corriente eléctrica continua apta para la protección de la estructura.

La corriente externa disponible es impresa en el circuito constituido por la estructura a proteger y la cama anódica.

La dispersión de la corriente eléctrica en el electrólito se efectúa mediante la ayuda de ánodos inertes cuyas características y aplicación dependen del electrólito.





El terminal positivo de la fuente debe siempre estar conectado a la cama de ánodo, a fin de forzar la descarga de corriente de protección para la estructura.

Este tipo de sistema trae consigo el beneficio de que los materiales a usar en la cama de ánodos se consumen a velocidades menores, pudiendo descargar mayores cantidades de corriente y mantener una vida más amplia.

En virtud de que todo elemento metálico conectado o en contacto con el terminal positivo de la fuente e inmerso en el electrolito es un punto de drenaje de corriente forzada y por lo tanto de corrosión, es necesario el mayor cuidado en las instalaciones y la exigencia de la mejor calidad en los aislamientos de cables de interconexión

## V.2.8 ANODOS UTILIZADOS EN LA CORRIENTE IMPRESA

- a. **Chatarra de hierro:** Por su economía es a veces utilizado como electrodo dispersor de corriente

Este tipo de ánodo puede ser aconsejable su utilización en terrenos de resistividad elevada y es aconsejable se rodee de un relleno artificial constituido por carbón de coque.

El consumo medio de estos lechos de dispersión de corriente es de 9 Kg/Am\*Año

- b. **Ferrosilicio:** Este ánodo es recomendable en terrenos de media y baja resistividad. Se coloca en el suelo hincado o tumbado rodeado de un relleno de carbón de coque.

A intensidades de corriente baja de 1 Amp, su vida es prácticamente ilimitada, siendo su capacidad máxima de salida de corriente de unos 12 a 15 Amp por ánodo. Su consumo oscila a intensidades de corriente altas, entre 0.5 a 0.9 Kg/Am\*Año.

Su dimensión más normal es la correspondiente a 1500 mm de longitud y 75 mm de diámetro.

- c. **Grafito:** Puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media y se utiliza con relleno de grafito o carbón de coque.

Es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser de cuidado. Sus dimensiones son variables, su longitud oscila entre 1000-2000 mm, y su diámetro entre 60-100 mm, son más ligeros de peso que los ferro silicios.

La salida máxima de corriente es de 3 a 4 amperios por ánodo, y su desgaste oscila entre 0.5 y 1 Kg/Am\*Año





- d. **Titanio-Platinado:** Este material está especialmente indicado para instalaciones de agua de mar, aunque sea perfectamente utilizado en agua dulce o incluso en suelo.

Su característica más relevante es que a pequeños voltajes (12 V), se pueden sacar intensidades de corriente elevada, siendo su desgaste perceptible. En agua de mar tiene, sin embargo, limitaciones en la tensión a aplicar, que nunca puede pasar de 12 V, ya que ha tensiones más elevadas podrían ocasionar el despegue de la capa de óxido de titanio y, por lo tanto la deterioración del ánodo. En aguas dulce que no tengan cloruro pueden actuar estos ánodos a tensiones de 40-50 V.

### V.2.9 FUENTE DE CORRIENTE

**EL RECTIFICADOR:** Es un mecanismo de transformación de corriente alterna a corriente continua, de bajo voltaje mediante la ayuda de diodos de rectificación, comúnmente de selenio o silicio y sistemas de adecuación regulable manual y/o automática, a fin de regular las características de la corriente, según las necesidades del sistema a proteger

Las condiciones que el diseñador debe estimar para escoger un rectificador son:

1. Características de la corriente alterna disponible en el área (voltios, ciclos, fases);
2. Requerimiento máximo de salida en C.D (Amperios y Voltios);
3. Sistemas de montaje: sobre el piso, empotrado en pared, en un poste;
4. Tipos de elementos de rectificación: selenio, silicio;
5. Máxima temperatura de operación;
6. Sistema de seguridad: alarma, breaker, etc;
7. Instrumentación: Voltímetros y Amperímetros, sistemas de regulación;

**OTRAS FUENTES DE CORRIENTES:** Es posible que habiendo decidido utilizar el sistema de corriente impresa, no se disponga en la zona de líneas de distribución de corriente eléctrica, por lo que sería conveniente analizar la posibilidad de hacer uso de otras fuentes como:

8. Baterías, de limitada aplicación por su bajo drenaje de corriente y vida limitada;
9. Motores generadores;
10. Generadores termoeléctricos;





## V.2.10 COMPARACIÓN DE LOS SISTEMAS

A continuación se detalla las ventajas y desventajas de los sistemas de protección catódica;

### ANODOS GALVANICOS

1. No requieren potencia externa;
2. Voltaje de aplicación fijo;
3. Amperaje limitado;
4. Aplicable en casos de requerimiento de corriente pequeña, económico hasta 5 amperios;
5. Útil en medios de baja resistividad;
6. La interferencia con estructuras enterradas es prácticamente nula;
7. Sólo se los utiliza hasta un valor límite de resistividad eléctrica hasta 5000 ohm-cm;
8. Mantenimiento simple;

### CORRIENTE IMPRESA

1. Requiere potencia externa;
2. Voltaje de aplicación variable;
3. Amperaje variable;
4. Útil en diseño de cualquier requerimiento de corriente sobre 5 amperios;
5. Aplicables en cualquier medio;
6. Es necesario analizar la posibilidad de interferencia;
7. Sirve para áreas grandes;
8. Mantenimiento no simple;
9. Resistividad eléctrica ilimitada;
10. Costo alto de instalación





### V.2.11 MEDIAS CELDAS DE REFERENCIA

La fuerza electromotriz (FEM) de una media celda como constituye el sistema Estructura-Suelo o independientemente el sistema cama de Ánodos-Suelo, es posible medirla mediante la utilización de una media celda de referencia en contacto con el mismo electrólito.

Las medias celdas más conocidas en el campo de la protección catódica son:

- ◆ **HIDROGENO O CALOMELO**( $H^+/H_2$ )
- ◆ **ZINC PURO** ( $Zn/Zn^{++}$ )
- ◆ **PLATA-CLORURO DE PLATA**( $Ag/AgCl$ )
- ◆ **COBRE-SULFATO DE COBRE**( $Cu/SO_4Cu$ )

La media celda de **Hidrógeno** tiene aplicación práctica a nivel de laboratorio por lo exacto y delicado. También existen instrumentos para aplicación de campo, constituida por solución de mercurio, cloruro mercurioso, en contacto con una solución saturada de cloruro de potasio que mantiene contacto con el suelo.

La media celda de **Zinc puro** para determinaciones en suelo, siendo condición necesaria para el uso un grado de pureza de 99.99%, es utilizado en agua bajo presiones que podrían causar problemas de contaminación en otras soluciones y también como electrodos fijos.

La media celda **Plata-Cloruro de plata** de poco uso pese a ser muy estable, se utilizan especialmente en instalaciones marinas.

Más comúnmente utilizados en los análisis de eficiencia de la protección catódica son las medias celdas de **Cobre-Sulfato de cobre** debido a su estabilidad y su facilidad de mantenimiento y reposición de solución

La protección del acero bajo protección catódica se estima haber alcanzado el nivel adecuado cuando las lecturas del potencial-estructura-suelo medidos con las diferentes celdas consiguen los siguientes valores:

ELECTRODO	LECTURA
Ag-AgCl	-0.800V
Cu-SO <sub>4</sub> Cu	-0.850V
Calomel	-0.77V
Zn puro	+0.25V





### V.2.12 CRITERIOS DE PROTECCIÓN

Cuando se aplica protección catódica a una estructura, es extremadamente importante saber si esta se encontrará realmente protegida contra la corrosión en toda su plenitud.

Varios criterios pueden ser adoptados para comprobar que la estructura en mención está exenta de riesgo de corrosión, basados en unos casos en función de la **densidad de corriente de protección aplicada** y otros en función de los **potenciales de protección obtenidos**.

No obstante, el criterio más apto y universalmente aceptado es el de **potencial mínimo** que debe existir entre la **estructura y terreno**, medición que se realiza con un electrodo de referencia. El criterio de **potencial mínimo** se basa en los estudios realizados por el Profesor **MICHAEL POURBAIX**, en 1939, quién estableció a través de un diagrama de potencial de electrodo Vs pH del medio, un potencial mínimo equivalente a -850 mv con relación al electrodo de referencia cobre-sulfato de cobre, observando una zona definida por la inmunidad del acero.

Los criterios de potencial mínimo de protección que se utilizará es de -850 mv respecto al  $\text{Cu}/\text{SO}_4\text{Cu}$  como mínimo y permitiendo recomendar así mismo, un máximo potencial de protección que pueda estar entre los 1200 mv a -1300 mv, sin permitir valores más negativos, puesto que se corre el riesgo de sobre protección, que afecta de sobre manera al recubrimiento de la pintura, ya que hay riesgos de reacción catódica de reducción de hidrógeno gaseoso que se manifiesta como un ampollamiento en la pintura.

### V.2.13 RESISTIVIDAD DEL SUELO

Cuando se diseña protección catódica o simplemente cuando se estudia la influencia de la corrosión en un medio en el cual se instalará equipos o se tenderá una línea, es necesario investigar las características del medio, entre estas características, relacionada directamente con el fenómeno corrosivo se encuentra la resistividad del medio.

La resistividad es la recíproca de la conductividad o capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica.

En la práctica se ejecutan medidas de resistencia de grandes masas de material y se calcula un valor promedio para el mismo.

Las áreas de menor resistividad son las que tienden a crear zonas anódicas en la estructura, pero así mismo son las zonas más aptas para instalación de las camas de ánodos

En la práctica se realiza esta medida empleando un voltímetro y un amperímetro o bien instrumentos especiales como el Vibro-Graund complementados mediante un equipo de cuatro picas o electrodo directamente en el campo y mediante el Soil Box en laboratorio.

Cuando se ejecuta en el campo, el método consiste en introducir en el suelo 4 electrodos separados por espaciamientos iguales, los espaciamientos representan la profundidad hasta lo que se desea conocer la resistividad este espaciamiento se lo representa con (d).

Se calcula la resistividad aplicando la siguiente fórmula:  $rs=2*3.1416*d*Resistencia$ .





Resistividad ohm-cm	Características
bajo 900	Muy corrosivo
900 a 2300	Corrosivo
2300 a 5000	Moderadamente corrosivo
5000 a 10000	Medio corrosivo
Sobre 10000	Menos corrosivo

#### V.2.14 CORROSIÓN DEL CONCRETO REFORZADO

Corrosión del Concreto Reforzado en Pilotes expuestos al Agua del Mar El problema de corrosión en las estructuras de concreto reforzado, especialmente en pilotes de estructuras marinas, es uno de los mas frecuentes debido al contacto directo con el mar.

El agua de mar contiene aproximadamente 3.5 % de sal (predominantemente Cloruro de Sodio) así como algunos minerales y materia orgánica, si a esto agregamos una humedad conteniendo Oxígeno disuelto (primer agente corrosivo) estamos ante el ambiente ideal para el proceso de corrosión.

**La corrosión en estas estructuras, muestra tres zonas importantes: -**

- Una zona completamente sumergida de la estructura, que puede presentar algún grado de corrosión no muy alto, en el que el acero se corroe a muy baja rata. Aún cuando el nivel de Cloruros en esta sección sumergida excede el límite requerido para iniciar la corrosión en el acero de refuerzo, la disponibilidad de Oxígeno en la interfase concreto-acero se convierte en un factor de control. La difusión del Oxígeno en concreto totalmente saturado es muy bajo y solo puede soportar bajas ratas de corrosión. -
- Una zona intermedia, la mas importante desde el punto de vista de la corrosión; comprendida entre la alta y baja marea o Zona de Splash. Un continuo humedecimiento seguido por un secamiento, provee al concreto tanto de altas concentraciones de Cloruros como de suficiente Oxígeno. Esta situación tiende a ser peor por el desarrollo de macrocélulas entre regiones altas de la estructura de concreto; las cuales aún no sufren de corrosión pero disponen de Oxígeno en grandes cantidades y con la presencia de Cloruros terminan por corroer esta zona. Un alto porcentaje de corrosión ocurre en la zona de Splash.





- ◆ -La zona inmediatamente arriba de la zona Splash generalmente presenta un menor grado de corrosión debido a dos causas; primera, los Cloruros son transportados allí por el viento en menor cantidad y segunda el contenido de humedad del concreto es bajo.

La mayoría de los daños ocasionados a las estructuras semisumergidas se presenta en la zona de Splash, y es allí hacia donde se han dirigido las investigaciones tendientes a dar protección. El éxito alcanzado mediante la utilización de la protección catódica contra la corrosión, en losas de puentes y muchas otras estructuras de concreto reforzado, ha hecho que esta protección llame la atención para ser utilizada también en las subestructuras marinas.





## VI PLATAFORMAS MARÍTIMAS

La explotación de los recursos naturales incluyendo la perforación de pozos petrolíferos tiende a continuarse mar adentro, por lo que se requiere la construcción de plataformas para tal fin.

En la actualidad se construyen plataformas marítimas en fondo marino de gran profundidad con un procedimiento muy práctico y bastante estudiado. El equipo consiste en chalanes, remolcadores y un grúa de gran capacidad. En general se usan cuatro chalanes que transportan la Subestructura prefabricada, la superestructura también prefabricada, los pilotes y la grúa que son movidos por los remolcadores que, a su vez, se utilizan durante las maniobras de construcción, cuyas etapas son esencialmente las siguientes: a) Colocación de la Subestructura compuesta de guías para los pilotes y piezas de contraventeo, b) Hincado de los pilotes, c) Colocación de la superestructura y d) Colocación del equipo que servirá para operar la plataforma.

Varios tipos de plataformas fijas se han construido con muy buenos resultados y se ha experimentado con otros tipos como son las flotantes y las oscilantes que absorben la energía del oleaje mediante cambios de energía potencial y disipación por fricción, pero su efectividad aún no ha sido confirmada.

### VI.1 UNA CIUDAD EN MEDIO DEL MAR

Una plataforma marina es una isla artificial en medio del mar, con la maquinaria y lo útil necesarios para llevar a cabo la extracción de hidrocarburos y el procesamiento necesario para posterior transporte.

Jurídicamente, una plataforma es un barco. Su aspecto interior, los turnos de comida e incluso olor nos sitúan en un buque normal. Falta el capitán, pero en su lugar nos encontramos supervisor de la plataforma, una especie de alcalde que se ocupa desde los asuntos más complejos la producción hasta los más cotidianos.

En esta superficie de 75 por 40 metros viven unas 50 personas que, en dos turnos de 12 horas procesan los hidrocarburos incansablemente. 14 días seguidos que alternan con otros 14 descanso en tierra.

Trabajar en una plataforma conlleva una dureza que suele estar recompensada con unas primas de peligrosidad y lejanía que incrementan considerablemente el sueldo de un operario normal junto la plataforma, a modo de tiburón hambriento, da vueltas las 24 horas del día durante 3 días el barco de apoyo. Disponibles para emergencias y para traer cualquier necesidad de tierra ya sean materiales o alimentos, estos barcos hacen las veces de camión de la basura, que retira periódicamente.

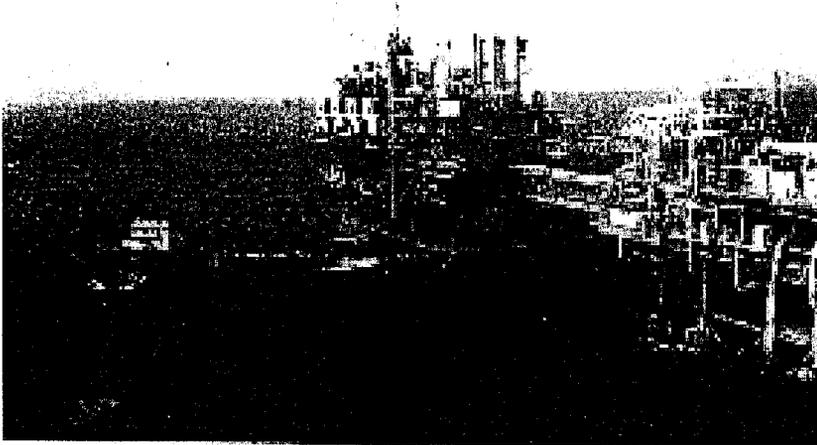
Algunas plataformas son unidades de trabajo y otras se destinan para habitación; no son estructuras aisladas, son parte de complejos que se unen unos a otros a través de ductos.





La unidad habitacional tiene su propia fuente de generación de electricidad, el agua que consume a bordo se obtiene por un proceso de desalinización del agua circundante. Los desechos orgánicos se procesan, otros se incineran y otros, ya compactados, se llevan a tierra; el cuidado ecológico es prioritario.

No todos los complejos tienen su unidad habitacional; es más, en estas aguas hay hoteles flotantes de 800 habitantes que se mueven estratégicamente dependiendo de la ubicación de la zona trabajo.



## VI.2 TIPOS DE PLATAFORMAS:

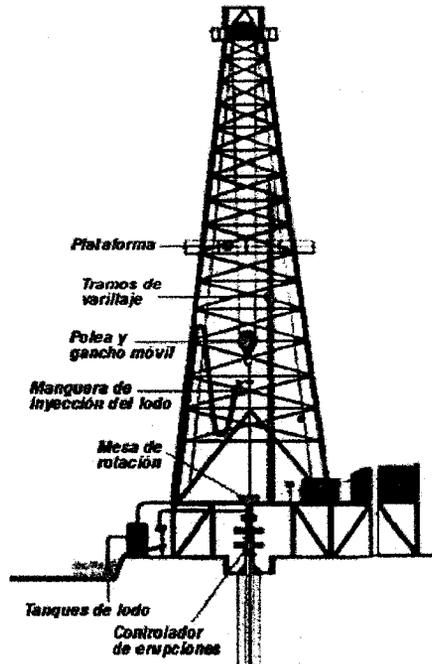
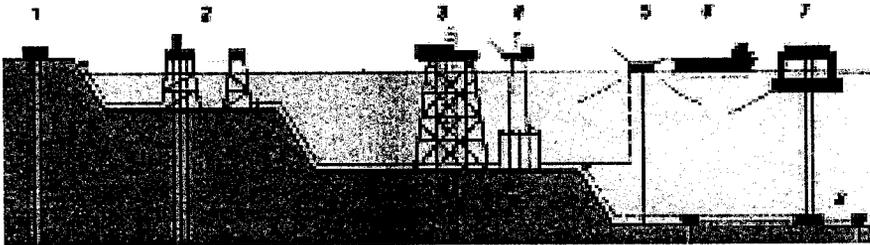
Cada complejo consistente de varias plataformas y cada plataforma tiene una misión diferente, en una gran obra de ingeniería, existen:

- Plataformas Marinas de Exploración y producción.
- Plataformas Marinas para Perforación.
- Plataformas Marinas para Enlace.
- Plataformas Marinas Habitacionales.





1. Pozo en tierra.
2. Plataformas móviles múltiples flujas.
3. Plataformas móviles de separación flujos.
4. Plataformas móviles de separación de los gases, separación por gravedad.
5. Molinos de molienda.
6. Rotatorio de almacenamiento / transporte y almacenamiento.
7. Plataformas móviles para montaje por cables de acero.
8. Colectores submarinos.

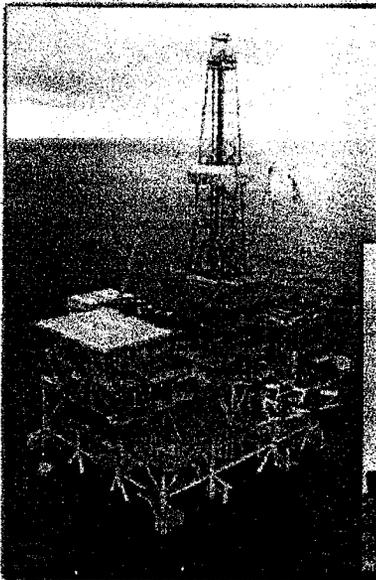




Se estima que casi un tercio del petróleo del mundo procede de yacimientos submarinos, y en particular, del Mar del Norte, el Golfo Pérsico, y el Golfo de México, donde se construyó en 1947, una de las primeras plataformas marinas, en sólo siete metros de agua. Gracias a los grandes avances de la ingeniería ahora, es posible construir plataformas más altas que la mayoría de los rascacielos del mundo y anclarlas al fondo del mar, en una lámina de agua de más de 400 metros de profundidad. Estas plataformas contienen miles de toneladas de equipos y pueden alojar a cientos de personas que trabajan en turnos, para que el petróleo se produzca, almacene y bombee a tierra firme sin interrupciones.

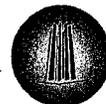
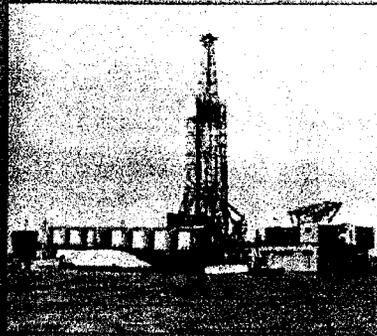
Actualmente las estructuras se han desarrollado de tal forma que no sólo permiten alcanzar profundidades impensables hace sólo unos años, sino operar en ambientes cada vez más hostiles desde el punto de vista ambiental.

Las primeras plataformas diseñadas específicamente para trabajar en el mar eran una estructura de acero, con una subestructura o *jacket* y unos cimientos formados generalmente por pilotes, que todavía hoy son las más frecuentes. También existen plataformas móviles o flotantes, que reciben el gas de pozos submarinos por medio de conductos conocidos como *tubing*. El descubrimiento de grandes yacimientos de gas natural en aguas profundas y los nuevos avances tecnológicos han acelerado el desarrollo de plataformas en los últimos 20 años, de manera que actualmente, el récord de producción se sitúa en más de 2.000 metros bajo el agua, en una instalación ubicada en la costa brasileña.



**Los comienzos:** producción en el Golfo de México en los años 40 (abajo).

**Hoy:** "Bulwinkle", la plataforma de perforación más alta del mundo, en el mismo Golfo, en aguas de 415 metros de profundidad (izquierda).





### VI.3 PROTECCIÓN CATÓDICA DE ESTRUCTURAS SUMERGIDAS

La protección catódica del acero en estas condiciones es bastante más sencilla que en el caso de estructuras enterradas, ya que por regla general, el electrolito tiene una resistividad uniforme y, además, si se trata de agua de mar, dicha resistividad es muy baja, entre 20 y 40  $\Omega$ -cm según los mares y, por lo tanto, la difusión de la corriente de protección se puede lograr con gran facilidad.

Hay que tener en cuenta que mientras que la protección catódica de una estructura de acero enterrada y desnuda es antieconómica, si dicha estructura estuviera sumergida en agua de mar podría confiarse su protección anticorrosiva a un sistema de protección catódica solamente, ya que si se le comunica la densidad de corriente adecuada, la superficie metálica podrá quedar recubierta por una capa calcárea causada por la precipitación de algunas sales presentes en el agua de mar, principalmente de hidróxido de magnesio y carbonato cálcico. Esta capa calcárea hará disminuir bastante la corriente de protección. De hecho, así sucede en los tanques petroleros, los cuales van, por regla general, sin pintar y protegidos por ánodos de sacrificio. Igualmente, muchas plataformas de sondeo y explotación de yacimientos petrolíferos submarinos llevan, a excepción de la zona de salpicadura, la superficie desnuda y protegida catódicamente (véase la figura 51).

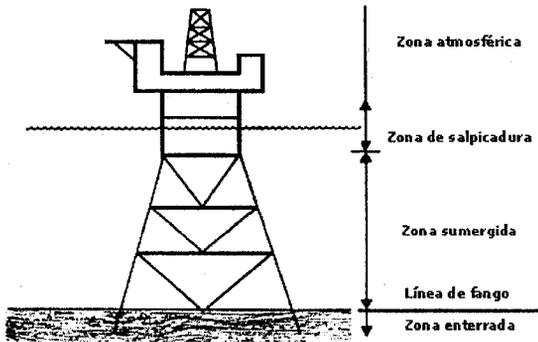


Figura 51. Diferentes zonas de corrosión en una plataforma marina (estructura "offshore").

#### Generalidades sobre el cálculo

La técnica de protección catódica a emplear es muy distinta en cada caso, dependiendo también de la clase de agua que rodea a la estructura metálica.

En cualquier caso y cualquier tipo de agua, la teoría de aplicación de la protección catódica siempre será la misma. Habrá que hacer circular una corriente determinada de I ampere por un circuito de resistencia total  $R\Omega$ , para lo cual se necesitará de una diferencia de potencial o tensión de V voltios.





La corriente en amperios será calculada fácilmente si se conoce la densidad de corriente necesaria para que la estructura metálica en contacto con el agua alcance el potencial de protección en toda su superficie. Existe mucha información al respecto y se han dado valores orientativos basados en la experiencia acumulada durante años. Estos valores de densidad de corriente vienen en miliamperes por metro cuadrado ( $\text{mA}/\text{m}^2$ ) y, por lo tanto, al conocer la superficie de acero en contacto con el agua, se puede calcular la corriente total necesaria. Por otra parte, este dato se podrá obtener también experimentalmente en cada caso, haciendo una inyección de corriente eventual y midiendo la intensidad.

La resistencia total del circuito de protección es perfectamente calculable ya que es la suma de la resistencia de la estructura frente al agua que la rodea (resistencia catódica), la de los ánodos (resistencia anódica) y la de los conductores eléctricos.

La resistencia de la estructura frente al electrolito resulta despreciable, ya que estas estructuras suelen tener una gran superficie en contacto con el agua. La resistencia de los cables es conocida, dependiendo de su grosor y longitud. La resistencia anódica se calcula dependiendo de las dimensiones geométricas de los ánodos utilizados y de la resistividad del agua. Esta resistencia, en el caso de ánodos de sacrificio o galvánicos, es la única que se tiene en cuenta. Más adelante se verá la forma de calcularla.

Conociendo la intensidad total que va a consumir la estructura y la resistencia del circuito, se puede determinar de inmediato el voltaje de salida que deberá tener la fuente de alimentación de la corriente ( $V = I.R$ ).

Lo dicho hasta ahora se refiere al cálculo de una instalación de corriente impresa, en la cual hemos calculado la intensidad y resistencia para obtener la tensión de salida del transformador. Ahora bien, si tenemos que hacer la instalación de protección con ánodos de sacrificio, habrá que tener en cuenta que cada material anódico (Zn, Al, Mg) dispone de un potencial de circulación fijo. Este potencial, como ya se ha expuesto, es la diferencia entre el potencial electroquímico de corrosión del metal anódico y el potencial del acero protegido, ambos medidos con respecto al mismo electrodo de referencia. Por lo tanto, sólo se dispone de 0.25 V si se utiliza el Zn, de 0.3 V si se emplea el Al y de 0.7 V si se usa Mg.

Para el agua de mar, los ánodos de Zn y Al normalizados por cada fabricante ya tienen tabuladas las salidas de corriente en amperes, que dependen de su forma geométrica (resistencia).

A continuación se describe el cálculo y ejecución de algunos casos comunes.

### **Estructuras sumergidas**

Las estructuras de acero sumergidas que se encuentran con mayor frecuencia son de dos tipos: fijas y móviles.

Las fijas, más comunes, se usan en obras portuarias, tuberías de transporte, compuertas y plataformas marinas y las móviles, en cascos de buque.

*Estructuras fijas sumergidas en agua.* Conocidas las dimensiones que la estructura tiene sumergida, conoceremos su superficie. A esta superficie se le aplicará la densidad de corriente adecuada.





Tratándose de agua de mar, habrá que tener en cuenta el efecto protector de las incrustaciones y su calidad, que está en función de la densidad de corriente aplicada. En efecto, una superficie de acero sumergida en agua de mar puede ser protegida catódicamente aplicando cantidades comprendidas entre  $60 \text{ mA/m}^2$  y  $2 \text{ mA/m}^2$ . Con altas densidades de corriente, la formación de incrustaciones, constituida principalmente por hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), es instantánea, voluminosa, muy porosa y se desprende fácilmente incluso con los movimientos del agua de poca velocidad.

Con densidades de corriente bajas, la formación de incrustaciones, constituida principalmente por carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ), es muy lenta; se forma una película delgada, dura y compacta, fuertemente adherida a la superficie metálica y que, por tanto, la protege mucho.

La instalación de protección catódica será tanto más económica cuanto los elementos constituyentes sean más pequeños y entren en menor número; las densidades de corriente óptimas están comprendidas entre los 200 y los  $60 \text{ mA/m}^2$ . Con  $100 \text{ mA/m}^2$  inicialmente, la capa incrustante tardaría entre 45 y 60 días en formarse definitivamente; estará constituida principalmente por carbonato cálcico y así la instalación quedaría protegida, una vez formada dicha capa, con una densidad de corriente de  $40 \text{ mA/m}^2$ , es decir, que la corriente de mantenimiento equivaldría a un 40% de la inicial.

Los casos y cifras anteriores se refieren a superficies de acero desnudas. Pero si la estructura a proteger está pintada, deberá aplicarse un factor de eficiencia de la pintura en función de los deterioros que haya sufrido durante el montaje. Para obras portuarias como pantalanes de pilotes o tablestacados, los factores de eficiencia de las pinturas oscilan entre el 80 y el 90%, es decir que la superficie que queda descubierta del acero será del 20 al 10% de la total. Por lo tanto, si tenemos una estructura de  $10\,000 \text{ m}^2$  de superficie sumergida, pintada con una buena pintura submarina, y que los deterioros sufridos en el montaje han sido del 10% (eficiencia del recubrimiento 90%) y aplicáramos una densidad de corriente de  $100 \text{ mA/m}^2$ , la cantidad de corriente que se deberá suministrar para protegerla catódicamente será igual a:

$$10\,000 \text{ m}^2 \times 100 \text{ mA/m}^2 \times 0.1 = 100\,000 \text{ mA},$$

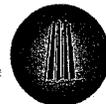
o sea, 100 amperes.

Este tipo de estructuras sumergidas fijas suele tener una parte enterrada en el fondo, la cual también va a demandar una corriente de protección que, por lo tanto, debe ser calculada. La fijación de los componentes de la estructura, como pilotes o tablestacas, se hace por hincado en el fondo marino por lo que este tipo de estructuras se deben considerar desnudas y de hecho se instalan desnudas, sin ningún tipo de recubrimiento, ya que si lo tuvieran, lo perderían casi todo en la operación de hincado. El acero desnudo en los fondos marinos puede demandar para su protección catódica una densidad de corriente que va de 20 a  $60 \text{ mA/m}^2$ .

Siguiendo con el ejemplo anterior, si nuestra estructura (de  $10\,000 \text{ m}^2$ ) tiene una parte enterrada de  $5\,000 \text{ m}^2$ , estimando una demanda de  $40 \text{ mA/m}^2$ , la corriente consumida sería de:

$$5\,000 \text{ m}^2 \times 40 \text{ mA/m}^2 = 200\,000 \text{ mA},$$

o sea, 200 amperes.





La corriente total demandada por esta estructura será 300 amperes, que se deberán suministrar por uno de los dos métodos posibles: ánodos galvánicos o corriente impresa. A continuación se presenta un análisis de ellos.

*Protección catódica por ánodos galvánicos.* Una estructura de este tipo suele estar constituida por elementos tubulares o perfiles normalizados. Tanto de los pantalanes como de las plataformas de sondeo y explotación, los elementos que las constituyen son tubos, que pueden o no estar unidos eléctricamente. Así mismo, hay determinados tipos de empalizadas portuarias constituidas por perfiles de varios tipos, pero que tienen, todos ellos, superficies unitarias calculables cuya suma nos daría la superficie total a proteger.

En tal caso, la protección con ánodos de sacrificio se calculará por superficies parciales, capaces de ser protegidas con un ánodo o grupo de ánodos (Véase la figura 52).

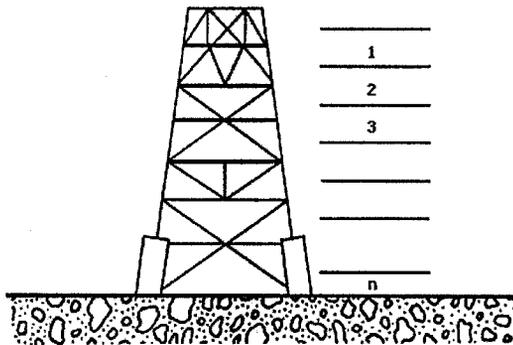


Figura 52. Representación esquemática de la división en zonas de una plataforma.

La cantidad de corriente que es capaz de suministrar un ánodo de unas determinadas dimensiones, o bien está dada en las tablas del fabricante o bien se puede conocer calculando su resistencia en un medio de resistividad conocida y sabiendo la diferencia entre el potencial de disolución del material anódico y el potencial de protección de la estructura de acero. Supóngase que se dispone de ánodos de Zn, con salidas de corriente de 2.5, 2, 1.4 y 1.2 A y que los 300 A que se han determinado anteriormente como necesarios para la protección de la estructura, corresponden a 160 pilotes de 1.9 A cada pilote. En este caso, se instalaría como mínimo un ánodo de 2 A de salida en cada pilote. La vida de esta instalación se calcularía en función del peso de aleación, de acuerdo con la fórmula ya presentada en la página 56:

$$\text{Vida} = \frac{Q \cdot P \cdot \theta \cdot \beta}{I},$$





en donde  $Q$  es la capacidad de corriente de la aleación en A-año/kg,  $P$  es el peso del ánodo,  $\theta$  el rendimiento,  $\beta$  el factor de utilización e  $I$  la intensidad.

La instalación de estos ánodos es muy sencilla, pero si la estructura ya está colocada puede llegar a ser muy costosa, porque se tendrían que emplear hombres rana con equipo de soldadura submarina. Los ánodos van equipados de un alma de acero sobresaliente por ambos extremos, la cual se conformará en la obra y se soldará en el lugar preciso de la estructura (Figura 53).

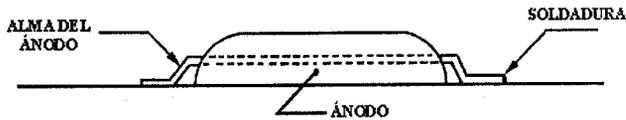


Figura 53. Detalle de la instalación de ánodos de sacrificio en estructuras fijas en el mar.

*Protección catódica con corriente impresa.* Para proteger catódicamente una estructura por corriente impresa, la corriente continua o directa se generará mediante un transformador con un rectificador a cuyo polo negativo se conecta la estructura y al polo positivo un conjunto de ánodos permanentes, conectados en paralelo.

Para conectar la estructura al polo negativo del generador de corriente continua, ésta debe de tener continuidad eléctrica entre todos los elementos metálicos que se quieren proteger. En el caso de una plataforma marina de sondeo o explotación, todas las partes metálicas sumergidas están soldadas entre sí y por lo tanto, la conexión se podrá hacer en cualquier punto de la estructura metálica.

Un pantalán está constituido por dinteles separados y, en ocasiones ni siquiera hay una continuidad entre pilotes de un mismo dintel. En estos casos hay que unir los pilotes de cada dintel ya sea soldando pletinas de acero entre ellos o bien mediante cables de cobre con aislamiento. Los dinteles se pueden conectar entre sí a través de cualquier elemento metálico de la superestructura que recorra el pantalán de un extremo a otro, por ejemplo por una tubería.

La cantidad de corriente necesaria para la protección puede suministrarse desde uno o varios transformadores instalados en el centro de carga de secciones equisuperficiales del pantalán. Es decir, en el caso anterior, los 300 A se podrían suministrar por un transformador con un rectificador de 300 A situado en el centro del pantalán, o bien con dos situados cada uno en el centro de cada una de las mitades del mismo, etc. El número de estos depende única y exclusivamente de consideraciones económicas, en la que se consideran, con mayor peso, las longitudes y secciones de cables.

Para introducir esta corriente en el electrolito, agua de mar en este caso, se emplea una serie de ánodos conectados en paralelo al polo positivo del transformador con un rectificador. Estos ánodos podrían ser los mismos que se emplean en la protección de estructuras enterradas, pero las condiciones mecánicas a que van a estar sometidos desaconsejan a algunos de ellos.





La chatarra de hierro es una mala técnica, porque se consume rápidamente y sólo se aconseja para instalaciones ocasionales y en industrias en las que dicha chatarra sobra y es fácilmente reemplazable. Un buen ejemplo de esto es la protección de cascos de buques cuando se están armando.

Los ánodos de grafito no funcionan demasiado bien en agua pues se acelera su consumo por deterioros mecánicos. La permanencia prolongada en el agua los esponja y pulveriza.

El ferrosilicio es comúnmente empleado cuando entra el cromo en proporciones de 4.5 a 6.5% en su composición. Las aleaciones de plomo con 2% de plata siguen empleándose en la protección exterior de cascos de buques, pero menos cada vez por su gran peso en la protección de estructuras fijas.

Tanto los ánodos de estas aleaciones de plomo como los de ferrosilicio tienen un gran peso y son incómodos de manejar debajo del agua. Se suelen instalar en lechos de ánodos convenientemente alejados de la estructura, depositados o enterrados en el fondo del mar. En la figura 54 se presenta un esquema de una instalación típica.

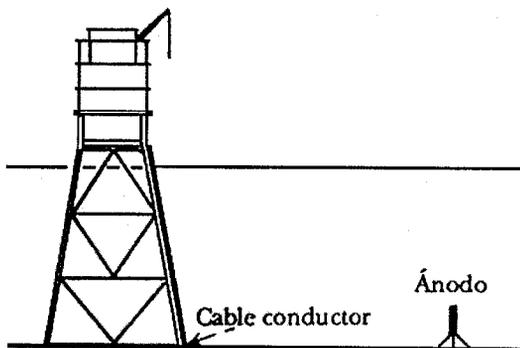


Figura 54. Ánodo remoto para la protección de una plataforma.

Para la protección de pantalanos tablestacados, plataformas, etc., el ánodo idóneo es el de titanio platinado. Las barras de titanio platinadas con cinco micras de espesor de platino soportan densidades de corriente hasta de  $1000 \text{ A/m}^2$  de superficie activa. Esto hace que cada metro de barra de 12mm de diámetro pueda suministrar 38 A con un peso bajísimo, propio del ánodo. Estos ánodos se colocan anclados a la misma estructura, ensamblados en armazones adecuados (véase la figura 55) circunstancia que evita la rotura de los cables anódicos ya que todo el tendido de cables se puede hacer en la superficie a excepción de las que bajan a los ánodos, las cuales irán dentro de un tubo de acero. La colocación, bajo el agua de estos ánodos es sencilla; la figura 55 muestra uno de los muchos ensamblajes que pueden hacerse con estos ánodos.



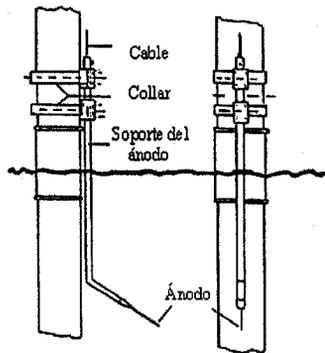
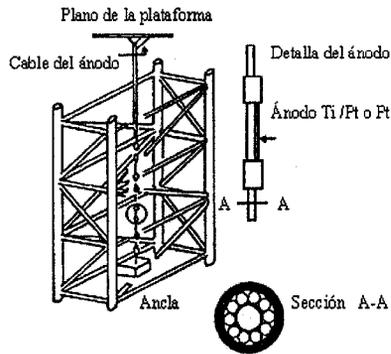


Figura 55. Ánodo de Ti/Pt, instalado sobre una plataforma.

Los ánodos de titanio platinado, si bien soportan una densidad de corriente muy elevada, en presencia de cloruros deberán de trabajar a bajo voltaje (entre 8 y 10 V como máximo). Así mismo, la corriente drenada por ellos ha de tener el menor componente de corriente alterna posible, es decir, la corriente rectificadora deberá de filtrarse, o bien proceder de un transformador trifásico para que su frecuencia sea superior a 100 Hz como mínimo, de lo contrario la capa de platino se deteriora.

Las obras submarinas fijas más frecuentes son los pantalanes y las tuberías submarinas. En el caso de un pantalán, los ánodos irán conectados en paralelo al polo positivo del transformador mediante un cable común al cual se empalman los cables de cada ánodo a través de cajas de derivación, las cuales servirán en todo momento para regular la corriente de salida por cada ánodo, y se intercalarán además, resistencias de equilibrio.





Este cable general anódico es el que determina el número de transformadores que se deben de instalar en un pantalán, ya que su longitud unida a la gran intensidad que debe circular por él a muy bajo voltaje, hace que sea de una gran sección. Al dividir el amperaje entre dos o tres transformadores, no sólo se divide en dos o tres la intensidad, sino también la longitud, dividiendo entre cuatro (con dos transformadores) o entre nueve (tres transformadores) la sección del cable.

Si se trata de una tubería submarina ("sea line"), el transformador irá instalado en tierra o en la plataforma de un pantalán, según si la tubería parte desde tierra o desde una de estas instalaciones portuarias. Los ánodos se pueden instalar enterrados en la playa, en el fondo del mar, sumergidos en el agua, usando como soporte un pilote auxiliar, o de cualquier otra forma, teniendo siempre en cuenta que el cable anódico esté protegido al máximo para que no se corte por el simple, deterioro de su aislamiento.





## VI.4 LIMPIEZA EXTERNA DE TUBERÍA CON CHORRO DE ARENA Y APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS EN DUCTOS ASCENDENTES EN PLATAFORMAS MARINAS DE PRODUCCIÓN.

### DESARROLLO.

#### ANTECEDENTES.

La protección anticorrosiva mediante recubrimientos en ductos localizados en plataformas marinas de producción, es una actividad muy importante que se realiza una vez que ha terminado la construcción del ducto ascendente y también durante la misma, debido a la necesidad de proteger el exterior de la pared del nuevo ducto de lo agresivo que es el ambiente marino para oxidarla cuando estos carecen de recubrimientos.

Los recubrimientos anticorrosivos que normalmente se aplican en plataformas marinas de PEMEX cumplen con los siguientes características:

- a) Alta resistencia eléctrica.
- b) Impiden el paso de la humedad.
- c) Su método de aplicación no afecta las propiedades de la tubería.
- d) Una vez aplicado no debe manifestar defectos.
- e) Debe tener buena adherencia.
- f) Ser resistente a microorganismos.
- g) Resistente al manejo, almacenaje e instalación de la tubería.
- h) Resistente al desprendimiento catódico.
- i) Resistente al ataque químico
- j) Fácil de reparar.
- k) Deberá de conservar sus propiedades físicas a través del tiempo.
- l) No tóxico.
- m) Resistente a efectos térmicos, al impacto y a la fricción.

Para seleccionar el recubrimiento apropiado deberán considerarse los siguientes factores:

- a) El medio en el que va a estar alojado el ducto.
- b) Accesibilidad al ducto.
- c) Temperatura ambiente durante la aplicación, almacenaje, construcción, instalación y prueba hidrostática.
- d) Localización geográfica y física.
- e) Compatibilidad con el tipo de recubrimiento de las tuberías existentes.
- f) Temperatura a la que va a trabajar el ducto.
- g) Manejo, almacenaje y método o técnica de instalación del ducto.
- h) Requerimientos de preparación de la superficie del ducto
- i) Costos.





### **APLICACIÓN DEL PROYECTO.**

El ducto ascendente de 36" diam. Ubicado en el nuevo Complejo de Producción Marino que forma parte del gasoducto de 77 Km. hacia la Terminal Marítima de Dos Bocas, Tabasco será integrado a un programa quinquenal de protección anticorrosiva mediante la aplicación de recubrimientos con los procedimientos que esta sección se desarrollarán a fin de mantener su buen estado durante su vida útil y además conservarlo para ampliar su vida útil pues es casi seguro que su servicio será requerido aún más por las necesidades de producción y transporte de gas marino hacia Dos Bocas y posteriormente hacia los Complejos Petroquímicos ubicados en el sur del estado de Veracruz, para máximo aprovechamiento.

En esta sección se desarrolla el procedimiento y requerimientos de equipos, personal y materiales que se necesitan al desarrollar este mantenimiento anticorrosivo en plataformas marinas.

### **LA APLICACIÓN DE RECUBRIMIENTOS ANTICORROSIVOS EN DUCTOS DE ACERO AL CARBÓN EN PLATAFORMAS MARINAS.**

#### **OBJETIVO**

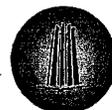
Establecer la metodología a seguir para la aplicación e inspección de protección anticorrosiva de ductos de acero al carbón que transportan hidrocarburos en ambientes marinos y costeros.

Mediante esta metodología se pretende lograr:

- a) Prevenir la corrosión exterior en ductos y sus accesorios en plataforma inmediatamente después de su construcción o durante ésta, así como una vez que hayan sido terminados trabajos de mantenimiento como el de sustitución de algún tramo o accesorio durante el periodo de servicio del ducto.
- b) La prevención de corrosión exterior en tuberías en plataforma se llevará a cabo mediante la aplicación de recubrimientos anticorrosivos complementados en la línea regular submarina con sistemas de protección catódica. Se debe poner especial atención para atenuar los efectos de corrientes parásitas en caso de confirmar su existencia.

#### **ALCANCE**

El presente procedimiento es aplicable a todas las actividades del área de pintura que impliquen trabajos de limpieza, aplicación de recubrimientos primarios, enlaces y/o acabados en las estructuras metálicas, tuberías de proceso y servicio, así como los accesorios de tuberías y que requieran ser inspeccionadas.





## ÁREA DE APLICACIÓN

Aplica a las actividades del área de limpieza y aplicación de recubrimientos anticorrosivos en ductos en plataforma o en instalaciones superficiales en tierra como trampas de diablos, válvulas de seccionamiento, arribos playeros, etc.

Donde se requiera la protección contra la corrosión exterior de ductos en ambientes marinos y costeros.

## RESPONSABLES

### Representante del cliente encargado de mantenimiento a ductos.

~ Coordinar al Ingeniero de Campo, Ingeniero de Control de Calidad, al Sobrestante General, al Cabo de Oficio Pintor y al personal involucrado en las actividades de aplicación de protección anticorrosiva.

### Ingeniero de Campo

~ Revisar y suministrar la información de la orden de trabajo para las actividades de aplicación de protección anticorrosiva.

### Ingeniero de Control de Calidad

~ Realizar la inspección de los Recubrimientos Anticorrosivos ya aplicados como se indica en este procedimiento a fin de comprobar su calidad.

### Cabo de Oficio Pintor

~ Dirigir, apoyar y verificar las actividades del personal bajo su cargo en las labores a desarrollar.

### Sopletero Pintor

~ Efectuar la limpieza, aplicación de recubrimientos primarios, enlaces y/o acabados en las estructuras metálicas, tuberías de proceso y servicio, así como los accesorios de tuberías como se indica en este procedimiento.

### Maniobrista Sopletero Pintor

~ Colocar los andamios en las partes requeridas donde se vaya a aplicar la protección anticorrosiva e instalar las lonas.





### Ayudante Sopletero Pintor

Apoyar al Sopletero Pintor en las actividades de aplicación de la protección anticorrosiva.

### INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN DE REFERENCIA REQUERIDOS.

Contrato celebrado entre cliente y el contratista que efectuará el trabajo, Orden de Trabajo, Especificaciones y Regulaciones Nacionales e Internacionales, según apliquen para la actividad a desarrollar, Especificación P.3.0351.01 "Aplicación e inspección de recubrimientos para protección anticorrosiva", Especificación P.2411.01 "Sistemas de protección anticorrosiva, a base de recubrimientos" y Especificación P.4.411.01 "Recubrimientos para protección anticorrosiva".

### CONDICIONES DE SEGURIDAD Y CONTROL AMBIENTAL

Las establecidas en el Manual de Seguridad Industrial y Manual de Protección Ambiental de PEMEX en la instalación donde se realizarán los trabajos.

### DESARROLLO

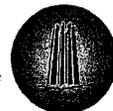
#### Actividades previas a la aplicación del recubrimiento.

El Representante del cliente coordina al Ingeniero de Campo, Ingeniero de Control de Calidad y al Cabo de Oficio Pintor, para las actividades a seguir en la aplicación de la protección anticorrosiva y gira las instrucciones pertinentes al personal involucrado con estas actividades.

El Ingeniero de Campo revisa y suministra la información de la orden de trabajo al Representante del cliente y al Cabo de Oficio Pintor. El Ingeniero de Control de Calidad verifica que la materia prima para la protección anticorrosiva, sea la especificada y que se encuentre dentro del período indicado en la fecha de caducidad. Tal materia prima incluye la arena sílica para la limpieza con chorro de arena, los recubrimientos anticorrosivos, los solventes, los productos químicos de limpieza, los andamios, etc..

El Ingeniero de Control de Calidad verifica que los instrumentos de inspección estén en condiciones operables para su correcta aplicación y que la calibración de los equipos esté vigente. Utiliza durante la inspección los siguientes equipos (enunciativos, no limitativos):

- Medidor de humedad relativa (higrómetro o similar)
- Lámpara comparadora de anclaje o similar.
- Peine de ranuras o navaja.
- Detector de continuidad.
- Medidor de espesor de pintura(Microtest o similar)





El Ingeniero de Control de Calidad verifica, utilizando un higrómetro, termómetro o equipo similar que las condiciones ambientales se encuentren dentro de los siguientes rangos: humedad relativa menor del 90%, temperatura ambiente no menor de 10 °C, asimismo la aplicación de los recubrimientos debe posponerse cuando se tiene el pronóstico de posibilidades de lluvia antes de que la película esté completamente seca, cuando se anuncian fuertes vientos o cuando la temperatura de sustrato se eleva más allá de los 70 °C, y registra los datos en el Formato Registro de Inspección de Protección anticorrosiva.

El Cabo de Oficio Pintor, dirige y apoya en todo momento al personal bajo su cargo en las labores a desarrollar.

El Maniobrista Sopletero Pintor coloca los andamios en las partes donde se vaya a aplicar la protección anticorrosiva, esto con el fin de realizar los trabajos con seguridad y calidad; así mismo se instalan lonas en las áreas próximas a equipos delicados y zonas recién pintadas donde se aplique el sandblast (chorro de arena) para evitar que sean afectados.

### **Preparación de la superficie**

El Cabo de Oficio Pintor coordina al personal bajo su cargo para preparar la superficie adecuadamente y remover por completo los contaminantes orgánicos, ya que pueden producir una adhesión pobre y una falla prematura de la película.

### **Métodos de limpieza**

Los métodos de limpieza de superficies que se utilizan según lo indique la orden de trabajo, son los siguientes:

#### **Limpieza química y/o con solventes.**

El Sopletero Pintor aplica la solución del producto químico seleccionado con brocha o por aspersión, dejándose sobre la superficie el tiempo suficiente para su acción, de acuerdo a las indicaciones del fabricante.

Elimina con herramientas manuales como rasqueta, espátula o cepillo los nódulos de corrosión, así como las capas gruesas de grasa y contaminantes.

Utiliza solventes limpios, en el último lavado para evitar la formación de una película superficial residual.

El Sopletero Pintor evalúa la efectividad del lavado con papel indicador de ph sobre el acero húmedo hasta obtener un valor igual al del agua empleada.





El Ingeniero de Control de Calidad bajo un criterio de examen visual, selecciona un área que sirve como patrón y representativa de las condiciones de la superficie por limpiar y se compara con la superficie limpia con solvente.

#### **Limpieza con herramienta manual.**

El Sopletero Pintor efectúa la limpieza con herramienta manual como los cepillos de alambre, martillos, rasquetas o cincelos para remover todo lo suelto, como la pintura no adherida, la herrumbre o la incrustación. Este procedimiento es satisfactorio para retoques y reparaciones en servicios menos críticos de recubrimientos. A continuación se mencionan los siguientes:

**Rasqueteo y cepillado.-** las superficies deben rasquetarse y cepillarse con alambre de acero, hasta desaparecer los restos de óxido, pintura u otras materias extrañas.

**Descostrado.-** las costras de óxido, escamas y restos de soldadura o escorias pueden eliminarse de la superficie metálica con la ayuda de marro, martillo y cincel.

**Lijado.-** los restos de óxido, pintura, etc. Que no se desprendan por medio de las operaciones anteriores, deben lijarse, para obtener un anclaje adecuado.

**Eliminación de polvo.-** la superficie debe limpiarse con brocha de cerda o cepillo, para eliminar partículas de polvo o sopleteando la superficie con chorro de aire seco y limpio.

El Ingeniero de Control de Calidad bajo criterio de examen visual, selecciona una área que sirve como patrón y representativa de las condiciones de la superficie por limpiar y se compara con la superficie limpia con herramienta manual.

#### **Limpieza con herramientas mecánica**

El Sopletero Pintor efectúa la limpieza con herramienta mecánica como cerdas, cepillos neumáticos, esmeriles o cualquier dispositivo de impacto.

Este método es satisfactorio para retoques y reparaciones, es usado en muchas ocasiones en combinación con otros métodos de limpieza.

El Ingeniero de Control de Calidad, bajo un criterio de examen visual, selecciona un área que sirve como patrón y representativa de las condiciones de la superficie por limpiar y se compara con la superficie limpia con herramienta mecánica.



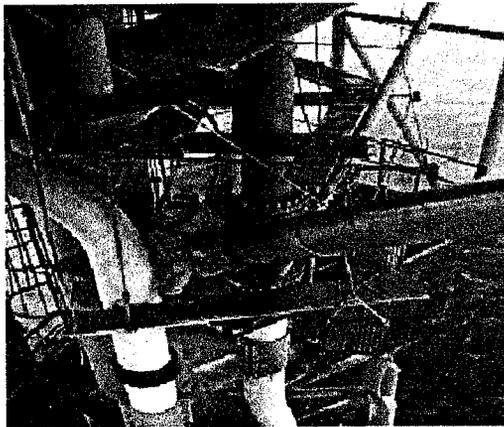


### **Limpieza con abrasivos.**

Se refiere a la limpieza de superficies metálicas aplicando chorro de abrasivos a presión.

El Sopletero Pintor aplica sandblast en la superficie a proteger hasta obtener la limpieza requerida para asegurar la adherencia de la película anticorrosiva.

Esta limpieza se realiza con arena sílica libre de humedad, grasa o aceite. Se realiza durante horarios soleados (ambiente seco), evitando así la presencia de humedad relativa excesiva que impida una buena limpieza de la superficie.



**FIGURA No. 99 SOPLETERO EN ACCIÓN**

De acuerdo a las especificaciones de las superficies preparadas con un chorro de abrasivos, podemos diferenciar los acabados siguientes que se utilizan cuando aplican y a solicitud del Cliente:

**Metal blanco (SSPC-SP-5 o NACE No. 1).**- La limpieza ideal del acero, remueve completamente a toda la herrumbre y la escoria dejando un superficie de color gris ligero, uniforme y sin manchas negras, sombras o manchas de herrumbre.

**Cercano a metal blanco (SSPC-SP-10 o NACE No. 2).**- Este grado de limpieza remueve completamente a toda la herrumbre y la escoria dejando la superficie de color gris ligero, uniforme pero con ligeras sombras o coloraciones causadas por la herrumbre, o por la pintura que se encontraba en la superficie.

El 95% de cada decímetro cuadrado inspeccionado al azar, cumple con lo ideal.





**Comercial (SSPC-SP-6 o NACE No. 3).**- Este grado de limpieza remueve el óxido, escoria, aceite, pintura y otras sustancias extrañas, dejando una superficie de color gris oscuro, y no se requiere que sea uniforme, con ligeras sombras o coloraciones. Solamente el 67%, como mínimo, de cada decímetro cuadrado inspeccionado cumple con lo ideal.

El equipo de sandblast se compone de los siguientes implementos (enunciativo no limitativo):

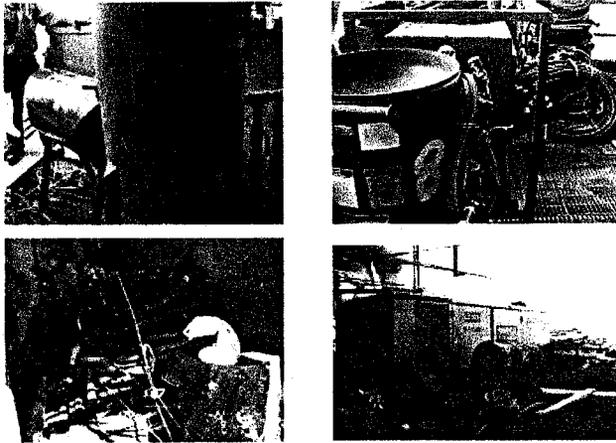


FIGURA No. 100 EQUIPOS DE PROTECCIÓN ANTICORROSIVA Y SAND BLAST.

- ~ Olla para arena sílica sandblast con capacidad variable.
- ~ Compresor neumático con una capacidad mínima de 125 P.S.I.
- ~ Manguera para sandblast (es importante que un volumen de aire suficiente y constante sea suministrado a la boquilla a fin de mantener una presión apropiada, la selección del tamaño correcto de la manguera es esencial, se recomienda una de 1 ¼ pulgadas de diámetro).
- ~ Boquilla para manguera de sandblast (naturalmente, entre más grande es la boquilla, mayor es el área que puede limpiarse en una cantidad de tiempo determinada, se recomienda una de 3/8 de pulgada de diámetro).
- ~ Equipo de protección personal para Sopletero.

El Ayudante Sopletero Pintor limpia el polvo de arena sílica que quedó en la superficie previamente sandblasteadá con trapos secos y limpios.





El Cabo de Oficio Pintor verifica la limpieza del área y la profundidad del anclaje, que estén de acuerdo a lo especificado y lo registra en un reporte de soporte.

El Ingeniero de Control de Calidad verifica que la superficie en donde se aplicará el recubrimiento anticorrosivo esté libre de agentes contaminantes como grasas, aceites, crudo, etc. En caso contrario se asegura que se lleve a cabo la limpieza correspondiente.

Verifica que la rugosidad o profundidad del perfil que se obtenga e la superficie limpia y que servirá como anclaje para el recubrimiento sea la especificada en las normas correspondientes, realiza la medición utilizando la lámpara y el disco comparador de anclaje o un equipo similar, anotando el resultado en el Formato Registro de Inspección de Protección Anticorrosiva.

A continuación se mencionan los perfiles obtenidos por diferentes tamaños de abrasivos:

Abrasivo Boquilla: No. 69.5 mm (3/8") Presión 6.33-7.03 kg/cm <sup>2</sup> (90-100lb/pulg <sup>2</sup> )	Tamaño máximo de partícula	Perfil	
		(mm)	(mils)
Arena muy fina	80 mallas	0.0381	1.5
Arena fina	40 mallas	0.04826	1.9
Arena media	18 mallas	0.0635	2.5
Arena grande	12 mallas	0.07112	2.8
Gravilla de acero G	40 mallas	0.033-0.76	1.3-3.0
Gravilla de fierro G	25 mallas	0.083	3.3
Gravilla de fierro G	18 mallas	0.091	3.6
Gravilla de fierro G	16 mallas	0.1016	4.0
Gravilla de fierro G	12 mallas	0.203	8.0
Munición de acero S	20 mallas	0.046-0.07112	1.8-2.8
Munición de fierro S	18 mallas	0.076	3.0
Munición de fierro S	16 mallas	0.086	3.3
Munición de fierro S	14 mallas	0.091	3.6

Verificar que el abrasivo a utilizar sea arena sílica natural entre la mallas 18 y 80, que se encuentre totalmente limpia, seca, libre de sales u otros agentes contaminantes.

Verificar que sean cubiertas con cinta adhesiva zonas como biseles, manómetros y otros instrumentos o accesorios que pudieran ser dañados por la pintura.

Verificar que la pintura y el solvente (adelgazador) sean los determinados por la orden de trabajo y/o norma correspondiente.

Verificar que las pinturas y solventes (adelgazador) a utilizar no estén caducados y registra los datos en el Formato Registro de Inspección de Protección Anticorrosiva.

A continuación se mencionan los recubrimientos comúnmente usados:





RP-3	Primario de zinc 100% inorgánico tipo poscurado
RP-4 Tipo "A"	Primario de zinc 100% inorgánico tipo autocurante con base acuosa
RP-4 Tipo "B"	Primario de zinc 100% inorgánico tipo autocurante con base solvente
R- P6	Primario epòxico catalizado
RA-26	Acabado epòxico catalizado de altos sólidos
RA-28	Acabado de poliuretano
RE-32	Recubrimiento epòxico para zonas de marea y oleajes

Verifica que las áreas que se han limpiado con abrasivo, sean recubiertas con el sistema anticorrosivo elegido, antes de que hayan transcurrido 4 horas.

### Aplicación de recubrimiento primario.

El Sopletero pintor aplica el recubrimiento primario en la superficie limpia, por medio de aspersión o de brocha de acuerdo a la especificación que marque la orden de trabajo correspondiente y recomendación del fabricante del producto anticorrosivo.

El Cabo de Oficio Pintor verifica los datos pertinentes al proceso de aplicación de primario y los registra en un reporte de soporte.

El Ingeniero de Control de Calidad verifica que el tipo de primario sea el especificado en la orden de trabajo y anota el dato en el Formato Registro de Inspección de Protección Anticorrosiva.

Verifica que la preparación de la mezcla de pintura se lleve a cabo conforme a lo establecido en la especificación del fabricante y/o en la especificación correspondiente.

Verifica que las áreas que se han limpiado con abrasivo, sean recubiertas con el sistema anticorrosivo elegido, antes de que hayan transcurrido como máximo 4 horas, con el fin de evitar que la superficie metálica que se ha limpiado se oxide nuevamente o se contamine.



FIGURA No. 101 APLICACIÓN DE PINTURA EN DUCTO ASCENDENTE





Verifica el espesor de la pintura primaria seca mediante un microtest o un equipo similar, el cual no debe ser menor a lo requerido en las especificaciones de la orden de trabajo correspondiente y anota el resultado en el Formato Registro de Inspección Anticorrosiva.

En caso de ser menor el espesor, se aplica otra capa de pintura primaria en las áreas de bajo espesor y se inspeccionará 24 horas después de aplicada.

El Ayudante Sopletero Pintor limpia el polvo o impurezas de la superficie previamente pintada con trapos secos libres de grasas o aceites o con aire a presión.

**Aplicación de recubrimientos tipo enlace y acabado.**

El Sopletero Pintor aplica las capas de enlace y de acabado con el espesor y el color indicado en la orden de trabajo y/o norma correspondiente. El tiempo transcurrido entre cada aplicación de las capas debe ser mayor de 24 horas.

El Cabo de Oficio Pintor verifica los datos pertinentes al proceso de aplicación de enlace y acabado y los registra en un reporte de soporte.

El Ingeniero de Control de Calidad verifica que el tiempo transcurrido entre la aplicación del primario, la capa de enlace y el acabado sea por lo menos el tiempo de secado que se marque en las especificaciones del fabricante, anotando los datos en el Formato Registro de Inspección de Protección Anticorrosiva.

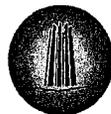
Verifica que la superficie donde se aplicará la capa de enlace y de acabado se encuentre limpia de grasa, aceite, polvo y otros contaminantes.

Verifica que la pintura y el solvente (adelgazador) que van a ser utilizados como enlace y acabado no estén caducados y anota los datos en Formato de Registro de Inspección de Protección Anticorrosiva.

Verifica que la preparación de la mezcla sea de acuerdo con las especificaciones del fabricante anotando los datos en el Formato de Registro de Inspección de Protección Anticorrosiva.

El Ingeniero de Control de Calidad verifica el espesor total de pintura seca, el cual no debe ser menor a lo requerido en las especificaciones de la orden de trabajo y las especificaciones correspondientes, considerando el sistema que se utiliza. Anota el resultado promedio obtenido durante las mediciones en el Formato Registro de Inspección de Protección Anticorrosiva.

En caso de ser menor el espesor, se aplica otra capa de pintura en las áreas detectadas y se inspeccionará nuevamente.





El Ingeniero de Control de Calidad verifica la adherencia de la pintura en caso de ser necesario.

En caso de que los resultados de la prueba de adherencia sean negativos, se procederá a efectuar la reparación del área, para lo cual se reiniciará el proceso de aplicación de sandblast y aplicación de protección anticorrosiva de acuerdo a este procedimiento, hasta que los resultados sean satisfactorios.

El cabo de Oficio Pintor verifica que se cumplan las variables críticas que se generen en el desarrollo del presente procedimiento y que se levanten los registros correspondientes de las actividades donde aplique.

**Inspección de película seca.**

El Ingeniero de Control de Calidad verifica que el sistema anticorrosivo haya terminado todos los procesos hasta el acabado (aplicación de primarios, enlace, acabados y secado según aplique el tipo de recubrimiento).

Verifica el espesor del sistema colocando el equipo sobre una superficie limpia donde se haya aplicado el recubrimiento, el cual reflejará el dato del espesor en la carátula o pantalla del equipo de inspección.

Compara el espesor obtenido con lo requerido por la norma correspondiente, y/o especificación de la orden de trabajo y/o fabricante para determinar el cumplimiento, anotando el promedio de los valores obtenidos en el Formato Registro de Inspección de Protección Anticorrosiva.

En caso de otro sistema de recubrimiento específico se realizará la verificación conforme lo marque el fabricante.

A continuación se describen las características de los sistemas comúnmente usados, para cada condición de exposición. Se incluyen los requisitos de preparación de superficie, de tipo primario, enlace y acabado, número de capas y espesor en milésimas de pulgada de película seca, de cada uno de ellos, así como el sistema de aplicación recomendado:

Condición de exposición	Preparación de la superficie	PRIMARIO			ENLACE			ACABADO			Aplicación
		Recubrimiento	No. de capas	Espesor En mils Por capa (seca)	Recubrimiento	No. de capas	Espesor En mils Por capa (seca)	Recubrimiento	No. de capas	Espesor En mils Por capa (seca)	
Ambiente marino	Limpieza con chorro de abrasivos	RP-4 "A"	1	2.5	RA-26	1	7	RA-28	1	2.5	Aspersión
		RP-4 "B"									
Zona de mareas y oleajes		RE-32	1	100	No se usa			No se usa			Manual





### **Inspección de continuidad a los recubrimientos aplicados.**

El Ingeniero de Control de Calidad coloca el cable de tierra del equipo detector de continuidad en una parte desnuda de la superficie metálica así mismo el otro cable lo conecta en el equipo de inspección el cual está previsto de una alarma la cual emite un sonido o enciende una luz cuando localice una discontinuidad de la película (rebabas, poros o áreas no recubiertas).

Realiza la inspección de la pieza o zona recubierta al azar o de acuerdo a los requisitos del Cliente.

Marca cualquier zona que presente discontinuidades, para que sean reparadas.

### **Prueba de adherencia a recubrimientos.**

El Ingeniero de Control de Calidad realiza la inspección con peine de ranuras a sistemas aplicados por aspersión, colocando el peine sobre la superficie limpia a inspeccionar el cual constará de seis cuchillas distantes entre sí de un milímetro para espesores totales hasta de 2.0 milésimas, de dos milímetros para espesores entre 2.0 y 10.0 milésimas y para espesores superiores debe utilizarse una separación entre cuchillas de tres milímetros. Se efectuarán cortes paralelos a través del recubrimiento en una dirección y otra serie de cortes transversales para formar 25 cuadros. El peine de ranuras debe colocarse siempre sobre películas secas y asegurarse de que todos los cortes lleguen hasta el sustrato si penetrar en el mismo, una vez realizado el enrejado se remueve el material sobrante durante el corte y se coloca una cinta adhesiva

sobre el mismo enrejado procediendo a despegarla rápidamente y de un solo movimiento.

Si no se cuenta con peine de ranuras se podrán realizar los cortes con una navaja o cutter, conservando siempre el mismo espacio según el espesor del recubrimiento.

El porcentaje de área desprendida permisible es hasta un 5% del área de los 25 cuadros.

### **Reparación de daños provocados por maniobras de traslado de elementos o quemaduras de soldadura, a la protección anticorrosiva recién aplicada.**

El Ingeniero de Control de Calidad determina por medio de inspección visual, las áreas donde se localizan daños en la protección anticorrosiva, y las marcas e indica al Cabo de Oficio Pintor.

El Ayudante Sopletero Pintor efectúa la limpieza con herramienta manual como lija o cepillo en las áreas indicadas por el Cabo de Oficio Pintor, con apoyo, si es necesario del área de maniobras.

El Cabo de Oficio Pintor aplica el recubrimiento primario, enlace y acabado en la superficie limpia, por medio manual o de aspersión, de acuerdo a la especificación que marque la orden de trabajo y recomendación del fabricante del producto anticorrosivo.





El Ingeniero de Control de Calidad verifica el espesor total de pintura seca, el cual no debe ser menor a lo especificado en este procedimiento. Esta inspección la realiza con apoyo de micro-test electrónico o equipo similar.

En caso de ser menor el espesor el Cabo de Oficio Pintor aplica otra capa de pintura en la áreas de bajo espesor y será inspeccionado nuevamente.

## **LA ELIMINACIÓN DE CORROSIÓN EN EL INTERIOR DE LAS ABRAZADERAS ANCLA POR MEDIO DE LA UTILIZACIÓN DE RECUBRIMIENTO ANTICORROSIVO DE FIBRA DE VIDRIO Y PINTURA.**

### **Antecedentes**

Actualmente la Región Marina Noreste de PEMEX cuenta con 183 ductos, los cuales suman 1950 km. de longitud con diámetros que van desde 8" hasta 48". Estos ductos transportan la producción de aceite y gas entre las plataformas marinas así como entre el área de plataformas y los centros de almacenamiento en Dos Bocas, la Estación de Recompresión de Atasta, el Centro de Distribución de Gas Marino Cd. Pemex y la Terminal Marítima de Cayo Arcas. La mayoría de estos ductos al salir o arribar a las plataformas son interconectados a ductos verticales que se encuentran sujetos a las piernas de las plataformas por medio de abrazaderas ancla, teniendo como destino final las trampas de diablos y su conexión con las líneas de proceso de la plataforma. Estos ductos verticales son llamados ductos ascendentes o risers.

Actualmente, y durante la etapa de construcción, entre las medias cañas de las abrazaderas ancla y los ductos ascendentes por diseño se colocan placas de neopreno para aislar eléctricamente al ducto y a la plataforma, así como para evitar el contacto metal a metal entre las abrazaderas y los ductos ascendentes.

Sin embargo, la concentración de humedad provocada por la alta salinidad del ambiente marino y la agresividad del medio genera un proceso acelerado de corrosión en el interior de la abrazadera, debido a la presencia de agua encapsulada entre las medias cañas de la abrazadera, el neopreno y el ducto.

Este proceso acelerado de corrosión puede llegar a perforar la pared del ducto en operación. La previsión de este fenómeno es pocas veces factible debido a que no vemos su desarrollo por la presencia de la abrazadera ancla. Lo único que podemos ver son escurrimientos de óxido bajo la abrazadera.

Por lo anterior PEMEX investigó las alternativas para la solución de este problema, así como la tecnología de punta disponible hoy día a fin de encontrar un recubrimiento anticorrosivo que se pudiera aplicar bajo las abrazaderas ancla en los ductos ascendentes en operación, que además fuese capaz de proveer al ducto de un blindaje anticorrosivo y que además resistiera los esfuerzos de compresión y corte generados por la sujeción de la abrazadera ancla.





## Definiciones

Para comprender mejor este reporte, anexamos las siguientes definiciones:

**Acción galvánica.** Reacción electrofítica espontánea en la celda en la cual el ánodo metálico se corroe.

**Acidez.** La presencia de un exceso de iones hidrógeno sobre iones hidroxilo u oxhidrilo (ver también **valor pH**).

**Aireación diferencial.** Acceso desigual de aire a diferentes partes de una superficie metálica, resultando frecuentemente en la estimulación de la corrosión en áreas donde el acceso del aire es restringido (ejemplo: zona de mareas y oleaje).

**Ampollamiento (de la capa de pintura).** La formación de hinchamientos o ampollas en la superficie de una capa intacta de pintura por humedad, gases, o la presencia de productos de corrosión entre el metal y la capa de pintura.

**Anaeróbico.** Falta de oxígeno libre. En este texto se refiere al estado del electrolito adyacente a la estructura metálica.

**Ánodo.** Electrodo a través del cual el flujo de electrones entra al electrolito.

**Ánodo de sacrificio.** Sinónimo para **ánodo galvánico**.

**Ánodo galvánico.** Electrodo utilizado para proteger una estructura por acción galvánica.

**Área anódica.** Parte de la superficie de un metal que actúa como un ánodo.

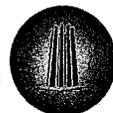
**Área catódica.** Parte de la superficie de un metal que actúa como un cátodo (recibe electrones del ánodo).

**Cátodo.** Electrodo a través del cual la corriente directa deja al electrolito.

**Celda.** Sistema electrofítico compuesto al menos de un ánodo, un cátodo y un electrolito intermedio.

**Corrosión.** Reacción química o electroquímica de un metal con sus alrededores, resultando en una degradación o destrucción progresiva.

**Electrodo.** Conductor metálico (incluyendo carbón) por medio del cual la corriente pasa hacia o desde el electrolito.





**Electrodo de referencia.** Electrodo cuyo potencial es exactamente reproducible y que sirve como base de referencia en la medición de los potenciales de otros electrodos.

**Electrolito.** Líquido o componente líquido en un material compuesto como el suelo, en el cual corriente eléctrica fluye por el movimiento de iones.

**Electronegativo.** Calificativo aplicado a un electrodo metálico para indicar que su potencial (voltaje) es negativo con respecto a otro electrodo metálico en el sistema.

**Electrósmosis.** Paso de un líquido a través de un medio poroso bajo la influencia de una diferencia de potencial.

**Electropositivo.** Calificativo aplicado a un electrodo metálico para indicar que su potencial es positivo con respecto a otro electrodo metálico en el sistema.

**Hidrógeno estándar – electrodo.** Electrodo de referencia consistente de un metal electropositivo, como el platino, en un electrolito conteniendo iones hidrógeno activos y saturados con hidrógeno gaseoso a una atmósfera estándar.

**Holiday o hueco.** Imperfección, usualmente en forma de picadura en un recubrimiento que protege al metal.

**Interacción corrosiva.** Incremento o decremento en la velocidad de corrosión, o la tendencia hacia la corrosión, de una estructura enterrada o sumergida ocasionada por la interceptación de parte de la corriente de protección catódica aplicada a otra estructura sumergida o enterrada.

**Ion.** Átomo o grupo de átomos que llevan una carga eléctrica positiva o negativa.

**Neutro.** Contiene igual concentración de iones hidrógeno e hidroxilo (ver también valor pH).

**Picaduras.** Corrosión no uniforme de un metal, caracterizada por un sinnúmero de cavidades (no en forma de grietas) en la superficie.

**Polarización.** Cambio en el potencial de un electrodo como el resultado de un flujo de corriente.

**Potencial estructura/electrolito.** Diferencia de potencial entre una estructura y un electrodo de referencia específico en contacto con el electrolito en un punto suficientemente cercano (pero sin tocarla) a la estructura para evitar errores debidos a la caída de voltaje asociada con cualquier corriente fluyendo en el electrolito.

**Producto de corrosión.** Compuesto o compuestos químicos producidos por la reacción de un metal - que se encuentra en el proceso de corrosión - con su medio ambiente.





**Reacción (anódica, catódica).** Proceso de cambio químico o electroquímico, tomando lugar particularmente en o cerca de un electrodo en una celda.

**Valor pH.** Escala logarítmica utilizada para indicar las concentraciones relativas de iones hidrógeno e hidroxilo en un electrolito.

### El fenómeno de corrosión bajo abrazaderas ancla

Actualmente es instalada bajo abrazaderas ancla una protección de neopreno para evitar el contacto metal-metal. Esta protección, al no tener un contacto homogéneo con la superficie del ducto ascendente genera acumulaciones de humedad en sitios específicos, lo cual inicia el fenómeno de corrosión. Desafortunadamente, la única indicación que tenemos de que este fenómeno se está llevando a cabo en los ductos ascendentes es un **escurrimiento de óxido** bajo la abrazadera ancla. La corrosión bajo abrazaderas ancla toma forma de cazuelas o picaduras con la consiguiente reducción de la capacidad estructural del ducto ascendente, poniendo en peligro la integridad de la estructura y al medio ambiente, en caso de tener una fuga.

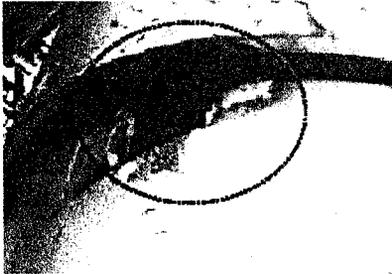


Fig. 1. Aspecto de la corrosión bajo abrazaderas ancla. En la fotografía se aprecia el neopreno en el espacio anular entre la abrazadera y el ducto. Nótese el escurrimiento de óxido bajo la abrazadera

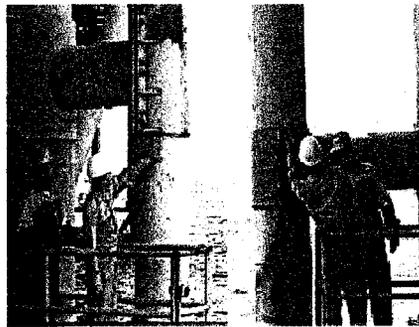


FIG. 5 Los autores señalando escurrimientos de óxido en una abrazadera ancla.

Ver Fig. 1 y 5

El fenómeno de corrosión bajo abrazaderas ancla puede ser conceptualizado como una **celda por concentración**. Una **celda por concentración** surge debido a diferencias de concentración de iones metálicos en el electrolito. Esto ocasiona una diferencia en el potencial del electrodo, de acuerdo a la **ecuación de Nerst** (ver nota al final). El metal en contacto con la solución más concentrada es el **cátodo**; el metal en contacto con la solución diluida es el **ánodo**. En la mayoría de los casos, el ducto asume el papel de ánodo, desgastándose en forma acelerada, mientras la abrazadera ancla permanece casi intacta. Ver Fig. 2



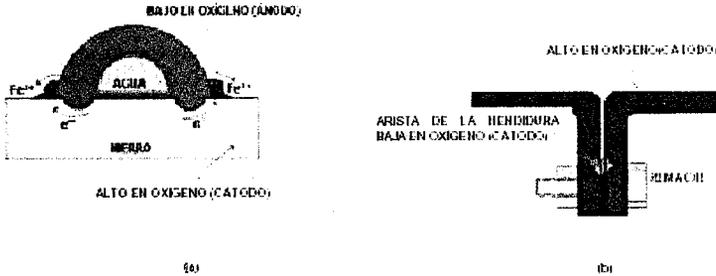


Fig.2. Celdas por concentración: (a) la corrosión ocurre bajo una gota de agua en una placa de acero debido a la baja concentración de oxígeno en el agua. (b)

En zonas localizadas entre la abrazadera ancla y el ducto puede ocurrir también una celda por concentración de oxígeno. La celda por concentración de oxígeno ocurre cuando el electrodo en la reacción catódica es el oxígeno,  $H_2O + \frac{1}{2} O_2 + 4e^- \rightarrow 4(OH)^-$ . Los electrones fluyen de las regiones con bajo oxígeno, que funcionan como ánodos, hacia las regiones altamente oxigenadas, que funcionan como el cátodo.

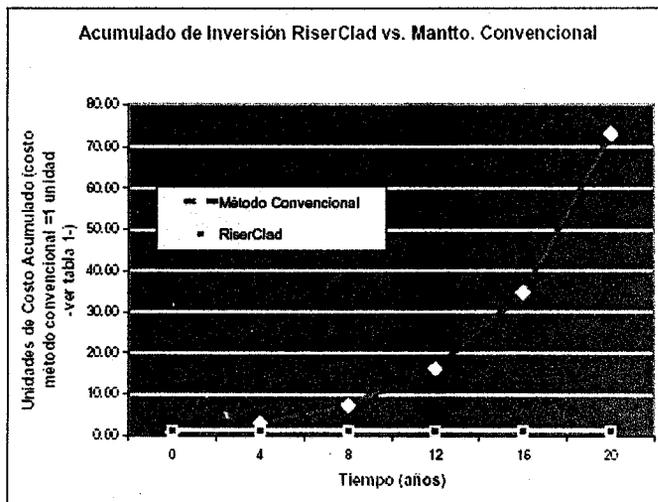
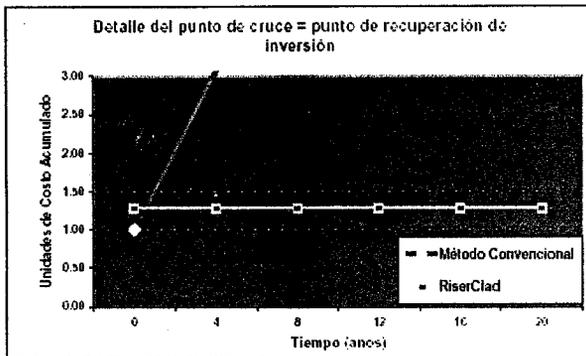
Los depósitos, como las gotas de agua Ver Fig. 2, impiden la libre oxigenación del metal base. En consecuencia, el metal bajo el depósito es el ánodo y se corroe. Esto causa una forma de corrosión con aspecto de picaduras. La corrosión al nivel del agua o en la zona de mareas y oleajes es similar. El metal sobre el nivel del agua es expuesto al oxígeno, mientras que el metal bajo el nivel del agua es privado de él; luego entonces, el metal bajo el agua se corroe. Normalmente, el metal a mayor profundidad a partir del nivel del agua se corroe más lentamente que el metal ligeramente abajo del nivel de agua, debido a la diferencia en distancias que los electrones deben viajar. Este problema se ve acrecentado por las altas temperaturas que manejan los ductos en la Sonda de Campeche, llegando a tener algunos de ellos más de 100°C.

### La corrosión bajo abrazaderas ancla en cifras.

La única forma de efectuar una inspección detallada de los efectos de la corrosión bajo abrazaderas ancla es removiendo la abrazadera. Este proceso, por el grado de inversión que representa, no es factible de ser efectuado a intervalos cortos de tiempo.

Los resultados del análisis de costos a lo largo del tiempo para el mantenimiento periódico que PEMEX efectúa normalmente bajo abrazaderas ancla comparado con la única instalación del recubrimiento RiserClad, se muestran en la Gráfica 1. En esta gráfica se aprecia el drástico crecimiento del acumulado de inversión por mantenimiento bajo abrazaderas ancla por ducto ascendente. La no-linealidad del crecimiento se debe al factor inflacionario considerado en el análisis, que es de un 20%. Pese a su inversión inicial, el recubrimiento RiserClad demuestra ser más económico a mediano plazo, recuperándose la inversión en un lapso menor de 4 años (ver punto de cruce en la gráfica a detalle).





Detalle de Gráfica 1.  
En este acercamiento del punto de cruce se puede apreciar que la inversión se

El mantenimiento que PEMEX realiza normalmente bajo abrazaderas ancla incluye:

1. Remoción de abrazadera ancla.
2. Limpieza de la superficie del ducto para inspección y aplicación de recubrimiento.
2. Inspección del ducto mediante Pruebas No Destructivas (PND).
2. Aplicación de recubrimiento primario inorgánico de Zinc tipo B RP-4, recubrimiento inorgánico de Zinc RP-6 y acabado de poliuretano RA-28-80.





Colocación de abrazadera ancla y placa de neopreno en el espacio anular entre la abrazadera y el ducto.

Estos trabajos se realizan aprovechando la estancia de una embarcación de construcción, y su periodicidad es de cada 4 años, aproximadamente. En el caso del RiserClad, la inspección bajo abrazaderas ancla –a diferencia de la inspección regular- es para verificar la integridad del recubrimiento, no para

**Gráfica 1.** Comparativo tiempo-costo para los dos métodos de reparación analizados en este texto técnico. El eje correspondiente a las Unidades de Costo Acumulado refleja la cantidad de veces que se ejerce el costo actual de reparación a lo largo del tiempo, en un periodo de 20 años. Como se puede apreciar, la reparación hecha con **RiserClad** puede ser considerada como permanente.

cuantificar los daños por corrosión en el ducto ascendente. Esta inspección es visual, no requiere remoción de la abrazadera y se realizaría cada 5 años. La inspección que incluye remoción de abrazadera se realiza a los 20 años de instalado el recubrimiento, y se haría aprovechando la estancia de un barco de construcción en la plataforma donde esté el producto instalado. El comparativo de costos para ambos procesos se muestra en la tabla siguiente.





Tipo de cambio:	de 9.50 pesos/dólar	Precios aproximados, Julio 1999		
<b>Método Convencional</b>				
Concepto	Tipo I		Tipo II	
	Importe M.N.	USD	Importe M.N.	USD
Barco	22,125.00	2,576.00	64,149.00	8,155.00
M.Obra	33,709.00		30,653.00	
Equipo	7,012.00		5,250.00	
Alimentación	2,516.00		7,018.00	
Materiales	6,394.82		6,394.82	
<b>Total</b>	<b>71,756.82</b>	<b>2,576.00</b>	<b>113,464.82</b>	<b>8,155.00</b>
<b>RiserClad con Barco</b>				
Concepto	Importe M.N.		USD	
Barco	36,662.00		7,500.00	
M.Obra	33,709			
Equipo	6131			
Alimentación	4767			
Materiales para retiro y mantenimiento de abrazadera	6394.82			
Materiales e instalación de RiserClad	3000		2389.03	
<b>Total</b>	<b>90,663.82</b>		<b>9,889.03</b>	
<b>Total MN RiserClad</b>		<b>184,609.61</b>		
<p><b>Nota:</b> Este cálculo se hizo en base a los promedios de los costos normales de mantenimiento y a un rendimiento óptimo de dos abrazaderas por jornada. Si se aplica el recubrimiento RiserClad desde plataformas, el precio baja considerablemente.</p>				

Tabla 1. Comparación entre los dos métodos de reparación bajo abrazaderas ancla. Los precios son aproximados y no deben tomarse para cotización. Estos precios son la base para las Unidades de Costo Acumulado (ver Gráfica 1).

Aplicación de los materiales compuestos de fibra de vidrio en la industria petrolera.

Nuestro compromiso como empresa de primer mundo en el ambiente petrolero nos ha llevado a la búsqueda de materiales de alto rendimiento, con un desempeño muy superior al de los materiales actualmente utilizados. Ejemplo de estos materiales de alto rendimiento son los materiales compuestos (*composite materials*), los cuales han comenzado a utilizarse en la industria petrolera para diversas aplicaciones, desde recubrimientos de alto desempeño bajo condiciones extremas, hasta sistemas de reparación de tuberías e inclusive las tuberías mismas.





Un material compuesto se obtiene al combinar las propiedades de dos o más materiales para obtener las propiedades finales deseadas del material. Los materiales compuestos se forman a partir de una gran variedad de materiales, incluyendo metales, cerámicos, fibras sintéticas, y por supuesto, plásticos y resinas sintéticas. Ha habido un tremendo interés en los últimos años en el uso de materiales compuestos en la industria petroquímica y petrolera costa afuera para varias aplicaciones en el proceso productivo. Las aplicaciones varían desde sistemas contra-incendio hasta líneas de proceso de hidrocarburos en refinerías, buques-tanque y en plataformas de petróleo y gas costa afuera. Según Shell1, las tres razones más importantes para utilizar materiales compuestos de fibra de vidrio en su plataforma MARS de \$1.2 billones USD en el Golfo de México, son:

1. Reducción en peso de los componentes de la plataforma.
2. Este material reduce los costos de instalación debido a su poco peso, siendo más rápido y fácil su manejo que el acero y no requiere equipo pesado para su instalación, un factor importante considerando que es una plataforma costa afuera.
3. La excelente resistencia a la corrosión, un alivio económico para el continuo mantenimiento requerido con el metal en un medio corrosivo salino.

### El sistema RiserClad

La búsqueda de una forma más eficiente y económica de corregir el problema de corrosión bajo abrazaderas ancla nos llevó a investigar dentro del campo de los materiales compuestos. Esta investigación se enfocó en encontrar un recubrimiento de alta adherencia, con una alta tolerancia sin degradarse ante el medio corrosivo marino y que ofreciese resistencia a la temperatura, además de otras propiedades mecánicas que le permitiesen soportar los esfuerzos de corte y compresión ocasionados por el movimiento del ducto y la presión de la abrazadera. Después de haber comparado entre varias opciones, el producto RiserClad demostró cumplir con nuestros requerimientos. Ver Fig. 3 y 4

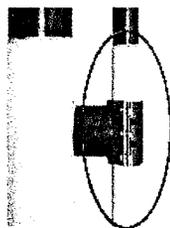


Fig. 3. Aspecto externo de RiserClad una vez instalado bajo la abrazadera ancla.

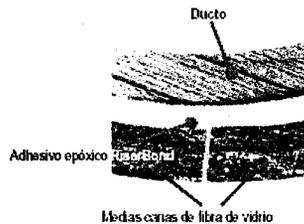


Fig. 4. Composición del sistema RiserClad





El sistema RiserClad está formado por dos partes:

1. Medias cañas de fibra de vidrio. Las medias cañas son formadas por capas tramadas de fibra de vidrio inmersas en una matriz de resina termofija.

Estas capas sucesivas son trefiladas sobre un molde cilíndrico regular, esto permite fabricar tubería de fibra de vidrio reforzada de cualquier diámetro comercial. Después de que está completamente curada la resina, la tubería es dividida en secciones y longitudinalmente. La resina contiene inhibidores de rayos UV para darle protección contra la degradación por acción de rayos solares al sistema. Son retardantes al fuego y proveen de resistencia mecánica al sistema.

2. Adhesivo epóxico vinil-éster con 100% sólidos por volumen RiserBond de dos componentes Ver Fig. 4. Este adhesivo se aplica al interior de las dos medias cañas de fibra de vidrio, para que al unirse sobre la superficie a ser protegida quede en el espacio anular entre las medias cañas y el ducto. Al tener 100% sólidos por volumen, desplaza aire, agua o cualquier sustancia en contacto con la superficie a proteger. En su versión estándar, este adhesivo soporta temperaturas de aplicación hasta de 65°C, y una vez curado, resiste hasta 100°C. Para aplicaciones de mayor temperatura, se cuenta con resinas especiales que permiten una temperatura de aplicación de hasta 100°C, y una vez curadas, resisten una temperatura de hasta 200°C; es normal que el cambio en propiedades físicas y químicas exigido por la estructura a ser protegida repercuta en forma directa en el costo del producto, elevando sustancialmente el costo del material para la reparación.

El sistema, una vez instalado y curado el adhesivo RiserBond, se conforma como un blindaje contra la corrosión, con las siguientes características:

**Resistencia a la temperatura:** 93° C en versión de adhesivo RiserBond estándar. Para aplicaciones especiales se cambia el adhesivo por uno de mayor resistencia a la temperatura, alcanzando hasta 200° C una vez curado. Retardante a la flama y con toxicidad de humos baja.

**Solubilidad en agua:** Cero.

**Desprendimiento catódico:** 1 mm de desprendimiento del ápice (ASTM G 42 – 90 días de duración en una solución de agua de mar sintética al 3% a 71° C, 1.5 Volts): 1 mm de desprendimiento del ápice (ASTM G 8 – 90 días de duración en agua de mar sintética al 3% a 24° C, 1.5 Volts).

**Resistencia dieléctrica del adhesivo RiserBond**  
286 volt/mil (ASTM D149). El espesor mínimo de aplicación es de 120 mils, esto da un total de 34320 Volts.

**Toxicidad:** Ninguna.

**Inmersión en agua salada:** Sin efecto (ASTM G 20)





Ciclo de temperatura: Sin cambio alguno (5 ciclos consecutivos de 0°C a 120°C)

Absorción de agua: <1.0% (ASTM D 570)

Resistencia al deslizamiento: 2,200 psi (ASTM C961)

Coefficiente de expansión térmica:  
34.7E-6 in / (in °F) Es mucho más elástico que el acero.

Resistencia al impacto: 225 lb-in (ASTM G-14 modificada)

Resistencia a la abrasión: 0.2 gr. de pérdida de peso (ASTM D4060 Taber – 5000 ciclos)

El sistema RiserClad se diseñó especialmente para la protección anticorrosiva en estructuras costa afuera, siendo especialmente útil en la prevención de la corrosión bajo las abrazaderas ancla o guía y en la zona de mareas y oleaje, ya que tiene excelentes propiedades de resistencia mecánica y al medio corrosivo marino, sin verse afectado por el medio y el tipo de servicio.

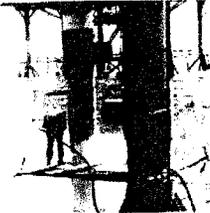
El producto es resistente a la abrasión y al impacto, y no es degradado por ataque químico o rayos UV. Como resultado tenemos un producto de larga duración y que elimina el mantenimiento periódico, siendo así muy económico a mediano plazo.

### Procedimiento de instalación

Para aplicar este recubrimiento, se siguen los siguientes pasos: Ver de la Fig. 1 a la Fig. 7



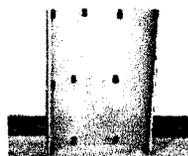
Fotografía 1 Medición de la superficie a proteger



Fotografía 2 Limpieza de la superficie con chorro de arena a presión



Fotografía 3 Limpieza de las medias cañas para dar mejor adherencia al adhesivo epoxídico



Fotografía 4 Corte de las canalizaciones de protección a intervalos regulares

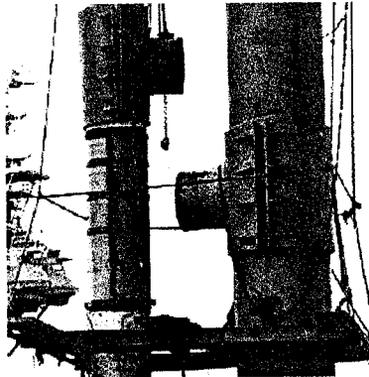


Fotografía 5 Mezclado del adhesivo epoxídico en un recipiente



Fotografía 6 Aplicación del adhesivo epoxídico a la superficie





Fotog. 7 Colocación del recubrimiento en la superficie a ser protegida. En la fotografía se aprecian los flejes temporales para comprimir el adhesivo hasta su secado.

1. Antes de comenzar con la preparación de la superficie, por seguridad debe determinarse si el espesor de pared remanente del ducto a repararse es seguro para las condiciones de operación. Cabe aclarar que aunque el producto RiserClad - con perforaciones de pared en el ducto de hasta 1/4" Ø- resiste hasta 2200 lb/in<sup>2</sup> (155 Kg/cm<sup>2</sup>), este no está diseñado para contener presión interna en caso de fuga, sino para ser utilizado como un recubrimiento anticorrosivo de alta adherencia y con elevadas propiedades mecánicas y químicas.

2. Limpiar la superficie a ser recubierta a metal blanco con chorro de arena a presión. La limpieza a metal comercial es suficiente, pero se obtienen mejores resultados para superficies limpias a metal blanco. Ver Fig. 2

3. Dimensionar la zona a ser protegida. Al ser RiserClad un producto hecho a base de fibra de vidrio, puede ser fácilmente cortado a la medida, e inclusive se pueden realizar "resaques" o adecuaciones en las medias cañas de fibra de vidrio mediante una sierra caladora, en caso de que existan muñones, interconexiones o cualquier otra característica que afecte la condición de geometría cilíndrica. Cuando existan defectos superficiales, estos deben ser dimensionados, anotados en el reporte de instalación y removidos mediante disco abrasivo o algún otro medio - siempre que sea posible- para asegurar un espacio anular adecuado entre las medias cañas de fibra de vidrio y el ducto. Ver Fig. 1

4. Limpiar químicamente la superficie a ser protegida con Xylol, thinner o algún otro solvente. Esta limpieza es para eliminar grasa o algún otro material que impida la adhesión completa de la resina a la superficie a ser protegida.





5. Limpieza ligera interior de las medias cañas de fibra de vidrio con chorro de arena a presión. Esta limpieza ligera es para romper la capa superficial interna de polímero en las medias cañas, generando un anclaje para el adhesivo epóxico RiserBond. Debido a esta característica superficial de poca porosidad en el encapsulado de fibra de vidrio, cuando este producto es aplicado en zona de mareas y oleaje, no permite la proliferación de crecimiento marino duro, ya que éste cae bajo su propio peso. Ver Fig. 3

6. Colocación de medias cañas de fibra de vidrio sobre la superficie a ser protegida. El propósito de esto es verificar que las medidas fueron bien tomadas, y que no haya algún obstáculo para la colocación del producto.

7. Colocación de centralizadores de neopreno en el interior de las medias cañas. Estos centralizadores aseguran una distribución anular uniforme de la resina RiserBond (adhesivo). El espacio anular mínimo es de 120 mils. Ver Fig. 4

8. Preparación de la resina RiserBond para su aplicación. La resina está formada por un compuesto base A y un catalizador B, en proporción  $A/B = 4$ .

Para mezclar la resina se recomienda el uso de un taladro de baja velocidad y alto torque con un agitador que se incluye en el Kit de reparación. La óptima mezcla se logra cuando el epóxico toma una textura homogénea y no se aprecian grumos o diferencias de color. La vida en lata del producto antes de ser aplicado en el interior de las medias cañas es de más de una hora a temperatura ambiente (25°C). Ver Fig. 5

9. Aplicación de adhesivo RiserBond en el interior de las medias cañas de fibra de vidrio.

La aplicación se puede hacer con brocha o con espátula. Aunque la resina no es tóxica, se recomienda la utilización de guantes de látex o de tela para este paso del proceso. Su tiempo promedio de aplicación no excede los 20 minutos. Ver Fig. 6

10. Colocación de las medias cañas con el adhesivo RiserBond sobre la superficie a ser protegida. Debido a su poco peso, este paso puede ser hecho por dos personas, no importando el diámetro del ducto ascendente a ser protegido. A partir de cierto diámetro, el producto puede deslizarse hacia abajo a causa de su propio peso antes de que el adhesivo polimerice; en estos casos se coloca un retén en la parte inferior de las medias cañas para evitar este movimiento. Una de las abrazaderas temporales puede ser utilizada para este fin.

11. Colocación de abrazaderas temporales para eliminar los excesos de adhesivo RiserBond, agua y aire. Estas abrazaderas temporales comprimen al adhesivo RiserBond hasta su secado completo, el cual toma 24 horas. Ver Fig. 7

12. Achaflanado en los extremos de RiserClad. Es una buena práctica el aprovechar el excedente de adhesivo RiserBond para dar un achaflanado a 45° para facilitar el escurrimiento de agua y otros líquidos por fuera del RiserClad, así como evitar el acumulamiento de humedad en la interfase ducto ascendente/RiserClad.





13. Limpieza exterior de las medias cañas de fibra de vidrio con Xylol o algún otro solvente para eliminar el exceso de RiserBond.

Aunque las propiedades definitivas de la resina RiserBond se alcanzan después de 7 días, la abrazadera puede ser colocada 48 horas después de haber instalado el recubrimiento RiserClad sin afectar sus propiedades, ya que el efecto de apriete de la abrazadera es benéfico para el curado completo de la resina.

**Prueba en campo del recubrimiento y resultados obtenidos.**

El 5 de junio de 1997 se instaló como prueba piloto el sistema anticorrosivo RiserClad en la plataforma Nohoch-A Excompresión en las abrazaderas ancla de dos ductos ascendentes: el ducto 064-A de 36" de diámetro, oleoducto salida hacia Dos Bocas con una temperatura de 65 grados centígrados y el ducto 177- B de 24" de diámetro, oleogasoducto de llegada de Nohoch-B, con una temperatura de operación de 30 grados centígrados..

El 24 de junio de 1999, después de poco más de dos años de instalado el producto, se procedió a la remoción de las abrazaderas ancla de ambos ductos, con la finalidad de efectuar una inspección completa y detallada del recubrimiento. Además mediante un cincel y martillo se retiró una pequeña muestra (1 pulgada cuadrada) del RiserClad documentándose los siguientes hallazgos en una minuta elaborada en el Complejo de Producción de Nohoch-A: Ver Fig. 9 y 10

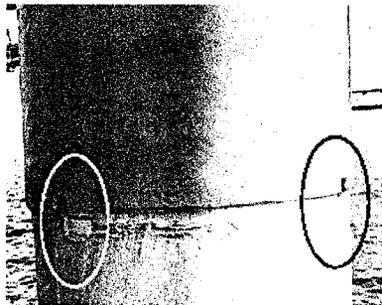


Fig. 9 Aspecto de dos de los puntos de muestra extraídos mediante cincel y martillo.





Fig. 10 Acabamiento de las muestras tomadas a martillo y cizalla en el recubrimiento. Nótese el excelente estado de la superficie bajo el recubrimiento a dos años de instalado el producto. Este aspecto se presentó en todas las muestras tomadas a ambos ductos. En la figura se aprecia también la composición a base de fibras del recubrimiento.

- No se encontraron grietas, fisuras, abultamientos o alguna otra falla por acción mecánica de la abrazadera ancla o degradación por acción de los rayos ultravioleta o el medio marino.
- El estado del metal bajo película es excelente en ambos ductos, no mostrando señal alguna de filtraciones o alguna marca de corrosión, demostrando con esto el buen desempeño del recubrimiento.
- En el ducto 064 de 36" Ø, en el que está instalado RiserClad arriba del monoblock, se observó que su temperatura es de 65°C, sin que esto afecte el estado del recubrimiento.

Comprobamos que el producto es atemperizante.  
Ver Fig. 6, 7 y 8

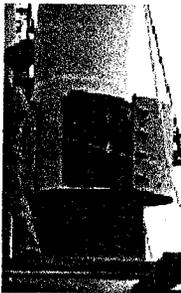


Fig. 8 Retiro de abrazadera ancla

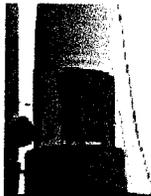


Fig. 6 Aspecto del recubrimiento después de retirar la abrazadera ancla

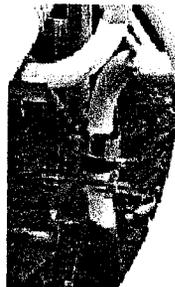


Fig. 7 Aspecto general de las partes de metal de la abrazadera ancla





No se aprecia una cristalización o fragilización del recubrimiento debido al efecto de la temperatura del ducto, los rayos ultravioleta, las condiciones de trabajo o el efecto combinado de estos, tanto en el adhesivo RiserBond como en las medias cañas de fibra de vidrio.

### Notas Finales:

1. **Ecuación de Nerst.** El potencial de un electrodo de un metal comparado contra el potencial del electrodo hidrógeno bajo condiciones estándar de 25°C y una solución de 1 mol (1-M) de iones metálicos en el electrolito es llamado **Potencial de Electrodo**. La **Ecuación de Nerst** nos proporciona el potencial de electrodo en soluciones no estándares, mediante la siguiente expresión:  $E = E_0 + 0.0592/n \cdot \log(C_{ion})$ ; donde **E** es el potencial del electrodo en una solución conteniendo una concentración **Cion** del metal en unidades molares, **n** es la valencia del ion metálico, y **E0** es el potencial estándar del electrodo en una solución 1-M. Note que cuando  $C_{ion} = 1$ ,  $E = E_0$ , lo cual obedece a las condiciones estándar.

### Conclusiones

La protección anticorrosiva de ductos en plataforma se realiza desde la construcción del ducto y se programa su renovación o reforzamiento cada cinco o seis años a fin de mantenerla en buen estado, debido a lo agresivo que es para el ducto, el medio ambiente marino en el que trabaja en el mar.

La corrosión que se genera en algunas ocasiones en el interior de las abrazaderas ancla de sujeción en la zona atmosférica ha sido totalmente eliminada gracias a la aplicación de medias cañas de fibra de vidrio de alta resistencia a la compresión y a la humedad que se pegan a la pared del ducto y posteriormente se abraza con este dispositivo mecánico de soporte impidiendo este recubrimiento anticorrosivo la introducción de humedad y la generación de corrosión.

Apoyándonos en los buenos resultados obtenidos en la inspección detallada realizada después de dos años de trabajo de estos recubrimientos anticorrosivos en las dos abrazaderas ancla, en las variadas y completas pruebas de laboratorio que sustentan a estos productos y en los análisis económicos que se han hecho al respecto, la Subgerencia de Inspección y Mantenimiento de la Región Marina Noreste propone la introducción de estos nuevos materiales de alto rendimiento, llamados **materiales compuestos**, con la finalidad de colocar a PEMEX a la vanguardia en tecnología de recubrimientos y de sistemas de reparación de tuberías.

Esta es la lista de algunas empresas que ya han utilizado este recubrimiento anticorrosivo en las abrazaderas anclas de sus ductos ascendentes: Shell Oil Co., Mobil Oil Co., Amoco Trinidad Oil Co., Chevron USA, Exxon Co. USA, Marathon Petroleum, BP Oil Co., Gulf of Suez Oil Co., Conoco.





Esto comprueba el cambio que ha habido en la tecnología de mantenimiento en la industria petrolera en los últimos veinte años. Los materiales compuestos, debido a que garantizan la recuperación de la inversión inicial a mediano plazo por el alto desempeño de sus características físicas y químicas, son la opción más viable en costo y de mayor duración para la protección de ductos marinos contra la corrosión en zonas atmosféricas.

Día con día se desarrolla nuevos materiales, con mayores tolerancias a la temperatura y con propiedades físicas superiores. No es de extrañarse que estos materiales formarán parte indispensable de la industria en un lapso no mayor de 20 años.





## CONCLUSIONES

Como conclusiones tenemos los siguientes puntos:

1. El proceso de corrosión debe ser visto como un hecho que pone en evidencia el proceso natural de que los metales vuelven a su condición primitiva y que ello conlleva al deterioro del mismo. No obstante es este proceso el que provoca la investigación y el planteamiento de fórmulas que permitan alargar la vida útil de los materiales sometidos a este proceso.
2. En la protección catódica entran en juego múltiples factores los cuales hay que tomar en cuenta al momento del diseño del sistema, inclusive es un acto de investigación conjunta con otras disciplinas más allá de la metalurgia, como la química y la electrónica.
3. En el trabajo se confirma que la lucha y control de la corrosión es un arte dentro del mantenimiento y que esta área es bastante amplia, dado el sin número de condiciones a los cuales se encuentran sometidos los metales que forman equipos y herramientas.
4. Las estructuras sumergidas en el mar están expuestas a ser afectadas con mayor facilidad por el proceso de corrosión debido a la gran cantidad de sales presentes en el agua de mar, por eso es importante conocer como se origina la corrosión, como prevenirla y como controlarla. Además resulta ser que la Protección Catódica es uno de los métodos más utilizados para combatir la corrosión en las Plataformas Marinas.
5. Una conclusión importante está el hecho de que hay que ahondar en estos conocimientos pues ellos formarán parte integral de la labor que debe desempeñar un Ingeniero de Mantenimiento.
6. Como última conclusión hago mención de la importancia que es conocer el tema de la corrosión, ya que este problema se presenta a diario y en todos lados; por eso es bueno saber ¿Qué es?, ¿Cómo se origina?, ¿Cómo prevenirla? y ¿Cómo controlarla?. Seleccione el tema de Protección Catódica entre los diferentes métodos que existen para controlar la corrosión, ya que es el más utilizado por su eficacia y practicidad. Este tema no fue fácil desarrollarlo, ya que a durante mi formación académica, no llevamos materias de Química, por lo que resultó un poco complejo cuando ahondé en este tema. Esto no quiere decir que no haya podido desarrollar este tipo de tema, ya que como Ingeniero Civil, cuento con la capacidad y habilidad para desarrollar cualquier tipo de problema que se presente. Confío que esta Tesis pueda servir a mis compañeros de generaciones futuras, como apoyo de temas similares.





## BIBLIOGRAFÍA

- ◆ Introducción a la Metalúrgica Física  
Sydney H. Avner
- ◆ Sistemas de Protección Catódica  
Elizabeth García. Universidad de Sonora. México
- ◆ ACI Comité 201, "Durability of Concrete in Service", en ACI Journal Proceedings, vol. 59, núm. 12, 1962, pp.40-50.
- ◆ Ávila, J., "Estudios diversos de corrosión electroquímica en refuerzos metálicos embebidos en mortero", en: 1er. Taller Internacional de Corrosión, Mérida, México, Conacyt-Cinvestav, 1992, p.127.
- ◆ Gaona T.C., Tesis de maestría, UNAM, México, 1997.
- ◆ Gaona, T.C., C.F. Almeraya et. al, "Protección catódica con ánodos de sacrificio empleando electrolitos sólidos", en: II Simposio Internacional de Electroquímica Aplicada y VIII Congreso Nacional de Electroquímica, Querétaro, México, 1993.
- ◆ García, E. M., J:M: Malo y CH.J Uruchurtu, "Técnicas electroquímicas aplicadas al control y seguimiento de la corrosión", 1a. ed., México. IMICORR, 1990.
- ◆ Kilareskki, W.P. "Corrosion Induced Deterioration of Reinforced concrete. An Overview 2", en Materials Performance, vol. 27, núm. 3, 1980.
- ◆ Marcela Vázquez  
Doctora en Ciencias Químicas, UN de Mar del Plata (UNMdP). Profesora Adjunta, dedicación exclusiva, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNMdP. Departamento de Ingeniería Química, Fac. de Ingeniería, UNMdP.  
Investigadora Adjunta, Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas, CONICET. División Corrosión, INTEMA, Fac. de Ingeniería, UNMdP.
- ◆ Raúl Fernández  
Doctor en Ciencias Biológicas, UBA. Profesor de Periodismo Científico, Universidad Centro de Altos Estudios en Ciencias Exactas (CAECE). Ayudante de 1º, Física y Química Biológicas, Facultad de Ciencias de la Salud y Servicio Social, UNMdP.  
Encargado del Programa de Divulgación Científica, Secretaría de Extensión, UNMdP.





- ◆ Reporte de instalación del recubrimiento anticorrosivo RiserClad en los ductos ascendentes de Nohoch-A Excompresión. Constructora Subacuática Diavaz, S.A. de C.V. / Pemex Exploración y Producción RMNE. Junio 1997.
- ◆ Protection of existing risers and structures against splash/tidal-zona corrosion. Shell International Exploration and Production NewsLetter.
- ◆ Splash Zone Maintenance Systems for Marine Steel Structures. NACE International Item. No. 24178. NACE International Publication 1G194.
- ◆ Fire endurance properties of composite pipe in hydrocarbon fires. Lea, Richard H. FRP '96 Symposium. Buffalo, N.Y.
- ◆ Catálogo de los productos RiserClad y su adhesivo RiserBond.
- ◆ Fundamentos de Ingeniería de Corrosión Instituto Mexicano del Petróleo "Subdirección de Tecnología de Explotación y Subdirección de Desarrollo Profesional. Ing. Manuel Felipe Guerrero Fernández. México D.F. Junio de 1985.

