

2ej. 11



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DESARROLLO Y FORMULACION DE UN
RECUBRIMIENTO INHIBIDOR DE
CORROSION 100% INORGANICO



T E S I S

EXAMENES PROFESIONALES
C. DE QUÍMICA

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

PRESENTA

FRANCISCO JAVIER BELAUSTEGUIGOITIA RIUS

México, D. F.

1987



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 está 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.

INDICE

PARTE TEORICA

CAPITULO I. INTRODUCCION

Breve descripción del recubrimiento.

CAPITULO II. CORROSION EN EL HIERRO; ASPECTOS GENERALES.

- II.1. Mecanismo general de corrosión. Variables que lo afectan.
- II.2. Formas de corrosión.

CAPITULO III. PREVENCION Y CONTROL DE LA CORROSION.

- III.1. Protección catódica.
- III.2. Protección anódica.
- III.3. Pasivación.
- III.4. Aleaciones.

CAPITULO IV. PROTECCION CON RECUBRIMIENTOS.

- IV.1. Vehículos y pigmentos inhibidores de corrosión; clasificación y características.
- IV.2. Diversos tipos de recubrimientos protectores contra la corrosión. Breve descripción de cada uno de ellos.

PARTE EXPERIMENTAL

CAPITULO V. FORMULACION DEL RECUBRIMIENTO.

- V.1. Normas para formular.
- V.2. Partes del recubrimiento, características principales.
- V.3. Mecanismo de formación de película.

CAPITULO VI. PRUEBAS COMPARATIVAS.

- VI.1. Pruebas de laboratorio y campo para calificar la eficiencia de cada recubrimiento. Informe de los resultados.

CAPITULO VII. FABRICACION Y CONTROL DE CALIDAD.

Método de fabricación; pruebas de control de calidad del recubrimiento.

CAPITULO VIII. PREPARACION DE LA SUPERFICIE. METODO Y EQUIPO DE APLICACION.

- VIII.1. Preparación que debe darse al acero para que el recubrimiento alcance sus propiedades óptimas.
- VIII.2. Método y equipo de aplicación.

CAPITULO IX. COMPATIBILIDAD CON ACABADOS DE DIVERSA INDOLE.

Acabados que puedan aplicarse sobre este recubrimiento según normas determinadas.

CAPITULO X. PROTECCION CONTRA LA CORROSION; IMPORTANCIA ECONOMICA.

Comparación de los costos de adquisición, aplicación y mantenimiento del recubrimiento en estudio con un recubrimiento comercial.

CAPITULO XI. CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

I. INTRODUCCION

BREVE DESCRIPCION DEL RECUBRIMIENTO: En la actualidad, para lograr una protección económica y eficiente contra la corrosión, se requieren recubrimientos altamente específicos; ya que debido a los altos costos de mano de obra, un recubrimiento será barato en la medida de su durabilidad.

El método más comúnmente utilizado para proporcionar dicha protección es interponer una barrera entre el metal y el medio ambiente. Otro método consiste en incluir en la capa protectora un agente de sacrificio que proteja electroquímicamente al sustrato metálico (galvanizado en caliente). Dentro de los agentes de sacrificio más eficientes que se conocen está el zinc metálico, y una de las características de las pinturas ricas en zinc, es que se combinan las formas de protección antes mencionadas; la interposición de una capa protectora, y en esa capa un metal de sacrificio que protege catódicamente al metal en cuestión.

Una de las innovaciones más relevantes en cuanto a la formulación de sistemas protectores contra la corrosión es la creación de un recubrimiento 100% inorgánico de dos componentes; uno que contiene zinc metálico como agente protector, y el otro que contiene un vehículo formador de película.

Este recubrimiento es de tipo autocurante y una vez curado forma un complejo básico de silicato de zinc, el cual proporciona al acero una excelente protección contra la corrosión, incluso en los ambientes más agresivos, tales como el industrial y el marino.

Las propiedades más sobresalientes de este recubrimiento son:

- 1) Curado rápido, inclusive en condiciones extremas (desde -10 C hasta 50 C y 25% hasta 100% de humedad relativa).
- 2) Excelente adhesión a sustratos debidamente tratados.
- 3) Alta resistencia a la temperatura.
- 4) Excelente protección contra la migración de la oxidación bajo película, además de un efecto sellante.
- 5) Excelente resistencia a humedad y a la intemperie.
- 6) Resistente a muchos agentes químicos.
- 7) Muy resistente al impacto y a la abrasión.

Las limitaciones de este recubrimiento son:

- 1) El sustrato debe limpiarse previamente con chorro de arena a metal blanco.
- 2) El polvo de zinc reacciona con ácidos y álcalis y se funde a 420 C; por lo tanto, no debe emplearse en sistemas cuyo valor de PH sea menor de 5 o mayor de 9, y cuya temperatura no sea mayor de 420 C.
- 3) El polvo de zinc tiene una densidad de 7.14 g/cm³. Para evitar que el polvo de zinc se deposite en los equipos de pintado, éstos deberán estar provistos de agitadores.

Este tipo de recubrimientos se emplea para:

- 1) Atmósferas marinas e industriales (construcción de barcos, plataformas de perforación, instalaciones portuarias, parques industriales, etc.)
- 2) Exposición a altas temperaturas (chimeneas, hornos de secado).
- 3) Sistemas donde se requiera resistencia a diversos agentes químicos (recubrimientos para tanques, contenedores, tuberías, etc.)

II. CORROSION EN EL HIERRO; ASPECTOS GENERALES.

El término corrosión podría definirse como la destrucción de un metal mediante una reacción electroquímica con su medio ambiente con el consiguiente deterioro en sus propiedades mecánicas. Muchos de los metales son inestables o químicamente activos, y bajo ciertas condiciones tienden a convertirse en combinaciones más estables. El hierro es un caso típico; reacciona con su medio ambiente (oxígeno, agua, ácidos, etc.) para formar una combinación más estable: el óxido de hierro.

Por lo general el hierro y el acero se corroen en presencia de oxígeno y agua, y el fenómeno de corrosión no se lleva a cabo en ausencia de cualquiera de estos dos compuestos. Por ejemplo, la corrosión en el acero no se lleva a cabo en aire seco y es mínima cuando la humedad relativa del aire es menor al 60% a temperatura ambiente. Es por eso que uno de los métodos para prevenir la corrosión es precisamente deshumidificando el aire. El agua, sin embargo, generalmente contiene oxígeno disuelto, lo cual representa un medio propicio para que se lleve a cabo el fenómeno de corrosión. En cambio, cuando el oxígeno disuelto se alcanza a eliminar, se considera que el agua es prácticamente no corrosiva (a menos de que esté acidificada o que contenga bacterias anaeróbicas que promuevan la corrosión).

II.1. MECANISMO GENERAL DE CORROSION. VARIABLES QUE LO AFECTAN

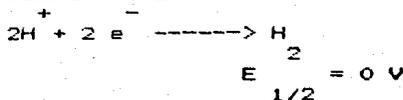
La electroquímica puede explicar satisfactoriamente el fenómeno de corrosión. En disoluciones electrolíticas la corrosión se localiza generalmente en ciertas áreas (ánodos) produciéndose un flujo de electrones hacia las áreas no corroídas o protegidas (cátodos). En la oxidación de metales ferrosos, el ánodo es la zona en donde el metal sufre una reacción de oxidación, produciéndose así iones metálicos y una corriente de electrones la cual se dirige al cátodo; en la región catódica se lleva a cabo la reacción de reducción; dicha reacción generalmente es la reducción de iones oxígeno o hidrógeno presentes en la disolución electrolítica generándose normalmente hidrógeno atómico. Esta formación de hidrógeno atómico forma una película muy delgada e invisible y la presencia de esta película impide el progreso de la reacción en dos formas: a) aislando o separando el metal de la disolución y b) aumentando la tendencia del hidrógeno a formar parte de la disolución a medida que se va depositando y oponiéndose así a la tendencia del metal a entrar en disolución.

Si esta película permaneciera adherida, la corrosión se detendría por completo; por otro lado, si el producto de la disolución del metal fuera insoluble, se formaría una capa protectora y el ánodo se obstruiría, impidiendo el progreso de la reacción. Sin embargo, sabemos que esto en realidad no ocurre debido a que los productos de la disolución del metal en el caso del acero y hierro son solubles, permitiendo así que la reacción se lleve a cabo si la película de hidrógeno atómico antes mencionada es removida.

Existen varias formas de remover esta película de hidrógeno. Si se analizan las reacciones que pueden llevarse a cabo en la

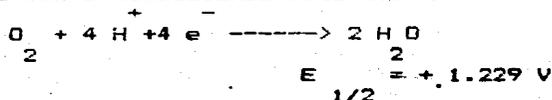
región catódica:

1) GENERACION DE HIDROGENO MOLECULAR:

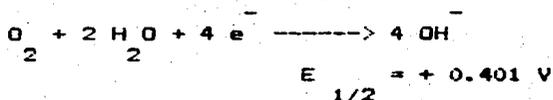


La formación de hidrógeno molecular es una reacción catódica muy común, ya que frecuentemente la corrosión se lleva a cabo en medios ácidos.

2) REDUCCION DE OXIGENO (SOLUCIONES ACIDAS):

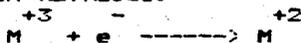


3) REDUCCION DE OXIGENO (SOLUCIONES BASICAS O NEUTRAS):

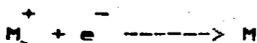


La reducción de oxígeno, ya sea en medio alcalino o ácido, también es bastante frecuente, ya que esta reacción puede llevarse a cabo en cualquier disolución acuosa que esté en contacto con aire.

4) REDUCCION DE UN ION METALICO:



5) DEPOSITO DE UN METAL:

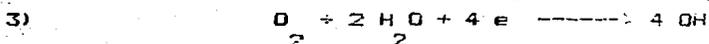


La reducción de un ion metálico y el depósito de un metal son reacciones menos comunes y se llevan a cabo en otro tipo de procesos electroquímicos.

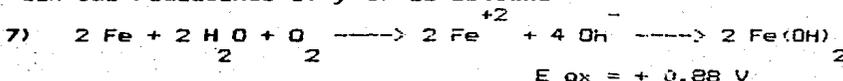
Si se analiza un caso típico de corrosión, como podría ser el contacto de una parte metálica (acero o hierro) con una disolución electrolítica (agua común y corriente) vemos que la reacción que se lleva a cabo en la región anódica es:



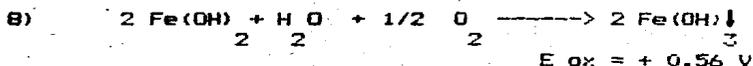
El agua y el agua de mar son casi neutras, por lo tanto la reacción catódica es:



Con las reacciones 3) y 6) se obtiene:



El hidróxido ferroso precipita en la disolución, sin embargo, este compuesto es inestable en disoluciones oxigenadas y se oxida para formar una sal férrica.



El producto final de la reacción es el óxido férrico.

La reacción de corrosión del hierro en medios acuosos es un proceso espontáneo; si se analiza un diagrama de potencial vs. pH para el sistema Fe - H₂O, pueden observarse las distintas especies que pueden existir según el pH y potencial del sistema.

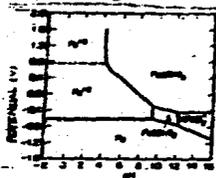


FIGURA # 1. DIAGRAMA SIMPLIFICADO POTENCIAL - pH PARA EL SISTEMA H₂O - Fe.

2

Durante el proceso de corrosión puede existir más de una reacción de reducción y de oxidación. Cuando se corroe una aleación, sus componentes metálicos pueden convertirse en los correspondientes iones metálicos. Si consideramos la disolución del zinc en ácido clorhídrico con oxígeno disuelto vemos que pueden ocurrir dos reacciones catódicas: 1) formación de hidrógeno atómico (reacción 1); y reducción de oxígeno en medio ácido (reacción 2). En un proceso electroquímico en el equilibrio, la velocidad de la reacción catódica debe ser igual a la de la reacción anódica. En este caso se tienen dos reacciones de reducción las cuales ocasionan que el flujo de electrones de la región anódica hacia la región catódica sea mayor que cuando ocurre una sola reacción de reducción; esto tiene como consecuencia que la reacción de oxidación (disolución del metal) proceda más rápidamente. Dicho de otra manera, las disoluciones ácidas que contengan oxígeno disuelto serán más corrosivas que las que no lo contengan y se observará el mismo efecto si cualquier agente oxidante está presente en la disolución.

Como las reacciones de oxidación y reducción que ocurren durante la corrosión son mutuamente dependientes, es posible reducir los efectos causados por la corrosión si se trata de reducir el flujo de electrones del ánodo al cátodo (remoción de impurezas que pudieran reducirse). Como se mencionó antes, el hierro no sufrirá daños debido a la corrosión si está en contacto con agua a la que se le ha extraído el oxígeno disuelto, ya que no hay reacción catódica posible.

La velocidad de una reacción electroquímica está limitada por factores químicos y físicos; cuando uno o varios de esos factores retardan la velocidad de reacción, se dice que la reacción está polarizada. Los tipos de polarización más importantes son:

- a) Polarización por activación.
- b) Polarización por concentración.

La polarización por activación corresponde a un proceso electroquímico en el cual el paso determinante de la secuencia de reacciones es la transferencia de electrones, y se lleva a cabo en la interfase metal-electrolito.

Si se analiza detalladamente la disolución del zinc en ácido clorhídrico y estudiando por etapas la reducción del hidrógeno se puede notar lo siguiente:

- 1) Antes de que ocurra la reacción de reducción las especies deben adsorberse en el cátodo.
- 2) Una vez que se adsorbieron, se lleva a cabo la transferencia de electrones, dando como resultado la reducción de las especies.
- 3) Dos átomos de hidrógeno se combinan para formar una molécula de hidrógeno.
- 4) Las moléculas de hidrógeno se combinan para formar una burbuja de hidrógeno gaseoso.

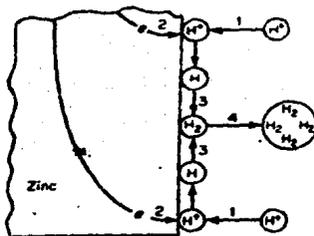


FIGURA # 2. POLARIZACION POR ACTIVACION.

La velocidad de reducción de los iones hidrógeno estará controlada por el paso más lento de los descritos anteriormente. Se dice que una reacción electroquímica está polarizada por concentración cuando las reacciones están controladas por la difusión de las especies en el electrolito.

Analizando el ejemplo anterior, si el número de iones hidrógeno en disolución es relativamente pequeño, la velocidad de reducción estará controlada por la difusión de iones hidrógeno a la superficie metálica. En este caso, la velocidad de reducción estará controlada por un proceso que se lleva a cabo en el seno de la disolución.

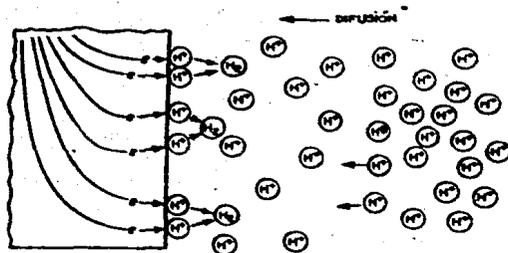


FIGURA # 3. POLARIZACION POR CONCENTRACION.

Generalmente una reacción está polarizada por activación cuando la concentración de especies activas es alta (ácidos concentrados); y una reacción está polarizada por concentración cuando la concentración de especies reducibles es baja (ácidos diluidos). En muchos casos la polarización por concentración durante la disolución del metal es muy pequeña y puede despreciarse; sólo es importante en la reacción de reducción. Dependiendo del tipo de polarización que pudiera controlar cierta reacción de reducción, las variables del medio producirán efectos distintos (no tendría sentido agitar una disolución para promover la migración de especies activas hacia el cátodo si la reacción está polarizada por activación. Se observaría un cambio si el proceso electroquímico estuviera polarizado por concentración).

II.2. FORMAS DE CORROSION

Es conveniente clasificar al fenómeno de corrosión de acuerdo a las formas en que se manifiesta y a la apariencia del metal atacado. Muchas formas pueden identificarse por mera observación visual y algunas pueden ser únicas, pero muchas otras pueden estar interrelacionadas. A temperatura ambiente las formas más comunes de corrosión son:

- 1) CORROSION UNIFORME.
- 2) CORROSION GALVANICA.
- 3) CORROSION CAVERNOSA O EN HENDIDURA.
- 4) CORROSION BAJO PELICULA.
- 5) CORROSION POR PICADURA.
- 6) CORROSION INTERGRANULAR
- 7) CORROSION SELECTIVA.
- 8) CORROSION - EROSION.
- 9) CORROSION POR BAJO TENSION (STRESS CORROSION CRACKING)
- 10) CORROSION POR HIDROGENO.
- 11) CORROSION BIOLOGICA.

1) ATAQUE UNIFORME

Este tipo de ataque es el más común, normalmente se caracteriza por una reacción electroquímica que procede uniformemente sobre la superficie expuesta; el metal se va desgastando uniformemente y eventualmente falla. Sin embargo, desde el punto de vista técnico, este tipo de ataque, por ser relativamente fácil de predecir, causa menos problemas que otros que se describirán más adelante.

2) CORROSION GALVANICA

Cuando dos metales distintos se encuentran inmersos en una disolución electrolítica, generalmente se establece una diferencia de potencial entre ellos; esta diferencia produce un flujo de electrones entre ambos metales, uno de los cuales se vuelve anódico (el metal menos resistente al ataque en ese medio) y el otro se vuelve catódico.

Esta forma de corrosión se reconoce por la localización del ataque cerca de la unión de ambos metales o aleaciones.

La corrosión galvánica es una reacción electroquímica, y para poder predecir y solucionar problemas debidos a este tipo de ataque se utiliza la serie galvánica (TABLA 2.) en lugar de los potenciales de oxidorreducción de media celda ó serie FEM (TABLA 1.), ya que la serie FEM está referida a metales puros y sus respectivos iones en disolución, y por lo general en situaciones prácticas se emplean aleaciones de dos o más componentes reactivos. En general las posiciones de los metales en la serie galvánica concuerdan con las de la serie FEM, en el caso de las aleaciones, puede notarse que también concuerdan las posiciones de las aleaciones (serie galvánica) con los correspondientes elementos constitutivos (serie FEM).

TABLA 1. SERIE FEM STANDARD.

METAL-ION METALICO EN EQUILIBRIO	POTENCIAL DE ELECTRODO VS. ELECTRODO NORMAL DE HIDROGENO
Au- Au ⁺²	+ 1.498
Pt- Pt ⁺³	+ 1.2
Pd- Pd ⁺²	+ 0.987
Ag- Ag ⁺	+ 0.799
Hg- Hg ⁺²	+ 0.788
Cu - Cu ²⁺	+ 0.337
H - H ⁺ 2	0.000
Pb- Pb ⁺²	- 0.126
Sn- Sn ⁺²	- 0.136
Ni- Ni ⁺²	- 0.250
Co- Co ⁺²	- 0.277
Cd- Cd ⁺²	- 0.403
Fe- Fe ⁺²	- 0.440
Cr- Cr ⁺³	- 0.744
Zn- Zn ⁺²	- 0.763
Al- Al ⁺³	- 1.662
Mg- Mg ⁺²	- 2.363
Na- Na ⁺	- 2.714
K - K ⁺	- 2.925

Otra característica importante de la serie galvánica es la de los grupos de aleaciones que se marcan con paréntesis. Los metales y aleaciones agrupados en estos paréntesis son similares de acuerdo a su composición (por ejemplo, cobre y aleaciones de cobre) y los paréntesis indican que en la mayoría de las aplicaciones prácticas el riesgo de sufrir daños por corrosión galvánica es mínimo si dos o más metales o aleaciones del mismo grupo entran en contacto electroquímico (ya que la diferencia de potencial generada es muy pequeña).

Un yate hecho con un casco a base de una aleación de 70% de Níquel y 30% de Cobre (metal monel) y remaches de acero, pronto quedaría inservible debido a la rápida corrosión de los remaches.

Este ejemplo resulta muy representativo y remarca la importancia de la selección apropiada de los materiales para fabricar, producir o crear determinado producto o equipo.

TABLA 2. SERIE GALVANICA DE ALGUNOS METALES Y ALEACIONES COMERCIALES EN AGUA DE MAR.

↑
noble o
catódico

Platino
Oro
Grafito
Titanio
Plata
(Chlorimet 3 (62% Ni, 18% Cr, 18% Mo)
(Hastelloy C (62% Ni, 17% Cr, 15% Mo)
(Acero inoxidable 18-8 Mo (pasivo)
(Acero inoxidable cromo 11-30% Cr (pasivo)
(Inconel (80% Ni, 13% Cr, 7% Fe) (pasivo)
(Níquel (pasivo)
Soldadura de plata
Monel (70% Ni, 30% Cu)
(Cuproniques (60-90% Cu, 40-10% Ni)
(Bronces (Cu-Sn)
Cobre
(Latón (Cu-Zn)
(Chlorimet 2 (66% Ni, 32% Mo, 1% Fe)
(Hastelloy B (60% Ni, 30% Mo, 6% Fe, 1% Mn)
Inconel (activo)
Níquel (activo)
Estaño
Plomo
Soldadura plomo-estaño
(Acero inoxidable 18-8 Mo (activo)
(Acero inoxidable 18-6 (activo)
Hierro fundido al níquel
Acero inoxidable cromo (13% Cr) (activo)
(Hierro fundido
Acero o hierro
Aluminio 2024 (4.5 Cu, 1.5 Mg, 0.6 Mn)
Cadmio
Aluminio comercial (1100)
Zinc
Magnesio y aleaciones de magnesio

↓
activo o
anódico

La naturaleza y agresividad del medio muchas veces determinan el grado de corrosión galvánica. Generalmente el metal o aleación con menor resistencia a un medio determinado se vuelve la parte anódica del par (aunque en otro medio distinto esta relación puede invertirse).

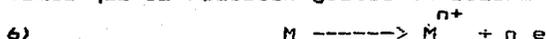
En la corrosión galvánica preomina la polarización por activación (polarización catódica), dicho grado de polarización varía según las aleaciones o metales que se vean involucrados. Otro factor sumamente importante en la corrosión galvánica es la relación existente entre las áreas anódica y catódica; una relación desfavorable sería un ánodo pequeño y un cátodo grande, ya que para un flujo de corriente determinado en la célula formada, la densidad de corriente es mayor para un electrodo pequeño que para uno grande; y entre mayor sea la densidad de corriente en el ánodo, mayor será el grado de corrosión.

Los efectos causados por este tipo de ataque son menores a medida que aumenta la distancia del punto en estudio a la unión metálica. El área afectada puede variar, según la conductividad del electrolito; en disoluciones con muy baja conductividad (agua pura), el ataque puede manifestarse como una ranura muy angosta.

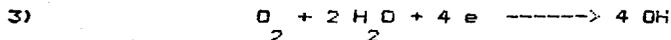
3) CORROSION CAVERNOSA O EN HENDIDURA

Este tipo de ataque generalmente se debe a estancamientos de electrolito en zonas determinadas (agujeros, juntas, hendiduras, etc.). Dichas zonas deben ser lo suficientemente anchas como para permitir la entrada del electrolito y lo suficientemente estrechas como para permitir el estancamiento de la disolución.

Hasta hace poco, se creía que la causa de esta forma de corrosión se debía a diferencias de concentración de oxígeno y iones metálicos entre la hendidura y sus alrededores; estudios más recientes han demostrado que efectivamente existen estas diferencias de concentración, pero esto no es la causa principal. Si consideramos una placa de metal inmersa en agua de mar (pH = 7) vemos que la reacción global involucra la disolución del metal:



y la reducción del oxígeno:



En un principio, ambas reacciones ocurren uniformemente sobre la superficie del metal, aunque después de un momento se interrumpe la reacción de reducción del oxígeno dentro de la hendidura debido a la convección tan restringida en esa zona. Esto no provoca ningún cambio en el proceso de corrosión, ya que el área de la hendidura generalmente es muy pequeña en comparación con el área externa, y la reacción global de reducción del oxígeno permanece casi sin cambio alguno.

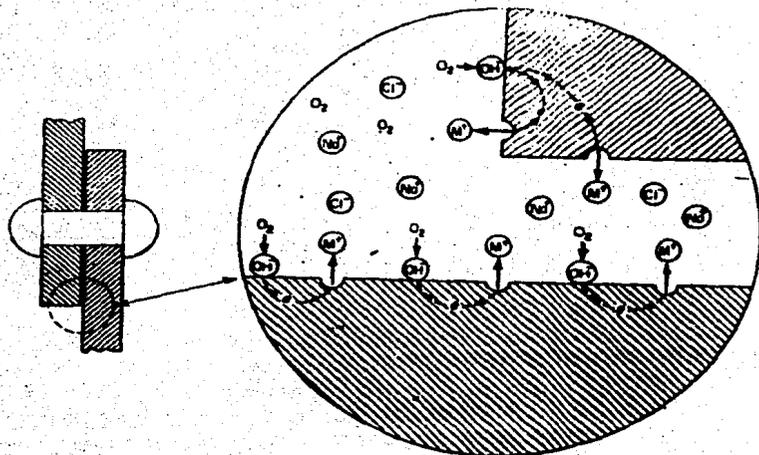
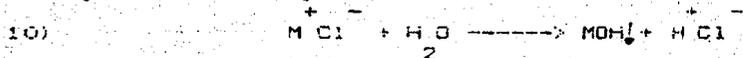


FIGURA # 4. CORROSION CAVERNOSA. ASPECTO INICIAL.

Una vez que se agotó el oxígeno, no existe reacción de reducción alguna en la hendidura, aunque la disolución del metal se sigue llevando a cabo. Esto tiende a producir un exceso de carga positiva en la disolución, y este exceso de carga se neutraliza mediante la migración de iones cloruro dentro de la hendidura, dando como resultado una concentración mayor de cloruro metálico dentro de la hendidura (los iones hidróxido también migran hacia la hendidura, pero la movilidad de los iones cloruro es mayor).

La hidrólisis de sales metálicas (excepto sodio y potasio), incluyendo cloruros y sulfatos es:



Los productos que se obtienen de esta hidrólisis son un hidróxido insoluble y un ácido. Los iones cloruro e hidrógeno aceleran las reacciones de oxidación de los metales y aleaciones (este hecho no se ha podido explicar correctamente), ambos están presentes en la hendidura y aceleran este proceso de disolución del metal. Este aumento en la disolución, aumenta a su vez la migración de iones, teniéndose como resultado un proceso autocatalítico.

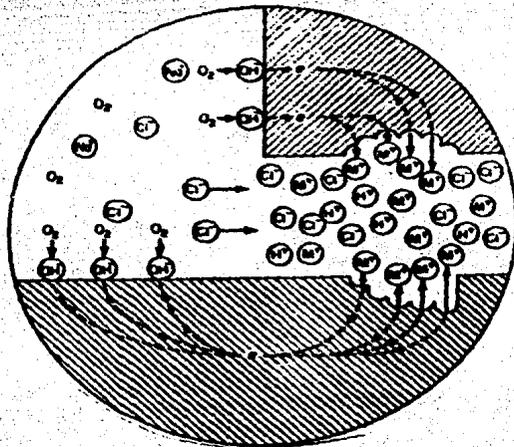


FIGURA # 5. CORROSION CAVERNOSA. ETAPA AVANZADA.

Se han podido determinar grandes diferencias de concentración y pH entre la disolución contenida en la hendidura y la disolución inicial (una concentración de cloruros de 3 - 10 veces mayor, y un pH de 2 - 3 unidades en la disolución contenida en la hendidura). A medida que avanza el proceso de corrosión dentro de la hendidura, la reacción de reducción del oxígeno en zonas adyacentes también se incrementa; esto protege catódicamente a las superficies adyacentes a la hendidura. Durante este proceso de corrosión el ataque se localiza en las zonas estancadas, mientras que las demás zonas casi no sufren daño alguno.

Este tipo de ataque normalmente requiere de un largo periodo de incubación (varios meses) hasta que se alcancen las condiciones precisas para su desarrollo.

4) CORROSION BAJO PELICULA (CORROSION FILIFORME)

Esta forma de corrosión es un tipo de corrosión cavernosa; en muchos casos, este tipo de ataque puede ocurrir bajo películas protectoras y se trata de un ataque muy especial, ya que no daña o destruye los componentes metálicos, sólo afecta el área superficial del sustrato metálico.

Bajo películas transparentes, los efectos de este ataque parecen una red de productos de corrosión. Los filamentos consisten en una cabeza activa y un rastro de productos de corrosión.

La variable más importante para que dicho fenómeno se lleve a cabo es la humedad atmosférica. Este tipo de ataque ocurre preferentemente cuando la humedad relativa está entre 65% y 90%; cuando ésta es menor, el metal no se ve afectado, y cuando es mayor, la corrosión se manifiesta por medio de ampollamientos.

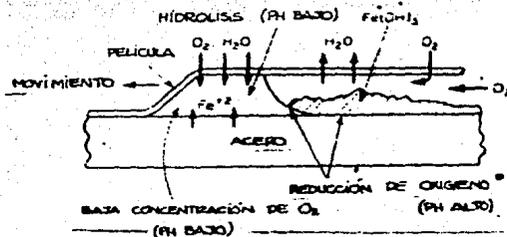


FIGURA # 6. CORROSION FILIFORME.

El mecanismo de esta forma de corrosión no se ha podido explicar correctamente; básicamente se piensa que este tipo de ataque es una forma de corrosión cavernosa. Durante el crecimiento, la cabeza del filamento está siendo abastecida de agua por la atmósfera circundante y por la acción osmótica debido a la alta concentración de iones metálicos disueltos. El fenómeno osmótico tiende a remover el agua del rastro inactivo debido a la baja concentración de sales solubles (los iones metálicos han precipitado en forma de hidróxidos), entonces continuamente se está difundiendo agua hacia la parte activa de este filamento. Aunque se difunde oxígeno a través de la película en todos los puntos, la concentración de oxígeno en la interfase cabeza-cola es alta debido a la difusión lateral. El proceso de corrosión se lleva a cabo sólo en la cabeza de este filamento porque los productos de corrosión causan que el medio se acidifique; por estas razones la corrosión bajo película puede entenderse como una hendidura que se propaga por sí misma.

6) CORROSION POR PICADURA

Este tipo de ataque se caracteriza por ser sumamente localizado e intenso, teniéndose como resultado perforaciones en la superficie afectada. Esta forma de corrosión es la más destructiva, ya que aunque la pérdida global de material causada por el ataque sea mínima, puede causar la falla de un equipo o estructura debido a alguna perforación con extrema rapidez.

Esta forma de corrosión generalmente requiere de un periodo de iniciación, pero una vez que se inició este proceso de corrosión, éste procede a una velocidad cada vez mayor.

En la figura # 7 se muestra el mecanismo que sigue una picadura durante este proceso de corrosión; si consideramos una pieza de metal M, inmersa en agua de mar, esta pieza de metal reaccionaría y se disolvería; y si por alguna razón la disolución del metal en algún determinado momento fuera mayor en un punto particular, los iones cloruro migrarían a ese punto para conservar la electroneutralidad (como se ha mencionado anteriormente, los iones hidróxido también migran, pero su movilidad es menor).

Durante la iniciación o etapas iniciales de este proceso, las condiciones para que se desarrolle la picadura son muy inestables. Se ha observado que picaduras recién formadas son inestables y muchas se vuelven inactivas después de poco tiempo de haberse formado.

La concentración local particularmente alta en determinado punto, puede variar o anularse debido a diversos factores como corrientes de convección, cambiándose así las condiciones y pudiendo así, impedir la formación de la picadura.

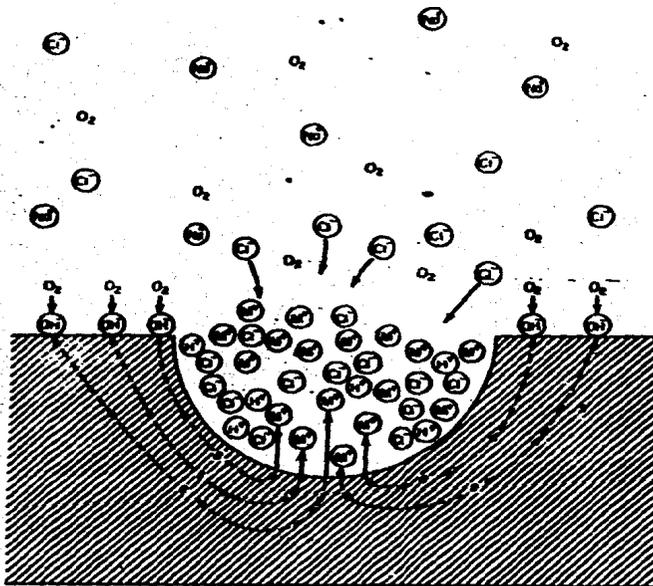


FIGURA # 7. CORROSION POR PICADURA.

En la picadura existe una alta concentración de MCl y como resultado de su hidrólisis (reacción 10) se tiene una alta concentración de iones hidrógeno y cloruro en esa zona. Como se mencionó anteriormente, los iones cloruro e hidrógeno estimulan la disolución de muchos metales y aleaciones, teniéndose como resultado un proceso autocatalítico. Como la disolución del oxígeno es prácticamente cero en disoluciones concentradas, no puede llevarse a cabo la reacción de reducción del oxígeno en la picadura; entonces, esta reacción se lleva a cabo en las superficies adyacentes a esta zona. Dicho de otra manera, la picadura protege catódicamente al resto de la superficie expuesta.

Las superficies más propensas a este tipo de ataque son aquellas hechas de aleaciones de acero inoxidable. Los resultados de muchos estudios hechos para conocer esta propensión se muestran en la tabla 3.

TABLA 3. EFECTOS CAUSADOS POR LA CORROSION EN FORMA DE PICADURA EN DISTINTAS ALEACIONES DE ACERO INOXIDABLE SEGUN SEA EL ELEMENTO QUE SE INCORPORA A LA ALEACION.

ELEMENTO	EFECTO CAUSADO EN LA RESISTENCIA AL ATAQUE
Cromo	Aumenta
Niquel	Aumenta
Molibdeno	Aumenta
Silicio	Disminuye, y aumenta con la presencia de molibdeno
Azufre y Selenio	Disminuye
Carbón	Disminuye
Nitrógeno	Aumenta

La adición de 2% de molibdeno al acero inoxidable 18-8S (tipo 304) para producir el 18-8SMo (tipo 316) tiene como resultado un aumento en la resistencia a este tipo de ataque.

<p>↓</p> <p>Aumento a la resistencia a sufrir picaduras</p> <p>↓</p>	Acero inoxidable tipo 304
	Acero inoxidable tipo 316
	Hastelloy F, Nionel, o Durimat 20
	Hastelloy C o Chlorimet 3
	Titanio

6) CORROSION INTERGRANULAR

Quando una aleación solidifica en un proceso de fundición, los átomos distribuidos aleatoriamente en estado líquido, pasan a formar parte de un arreglo cristalino. Este ordenamiento principia en muchos puntos y se van formando bloques. Cuando estos bloques se encuentran, puede existir un mal acoplamiento entre ellos y cuando el metal ha solidificado completamente, existen numerosas regiones de mal acoplamiento.

La configuración más estable en un metal es su arreglo cristalino particular, y estas zonas de mal acoplamiento son áreas de mayor energía y por lo tanto tienen una mayor actividad química; dicho de otra manera, las zonas donde existe un mal acoplamiento cristalino son más propensas a la corrosión que las regiones en las que el arreglo cristalino es perfecto.

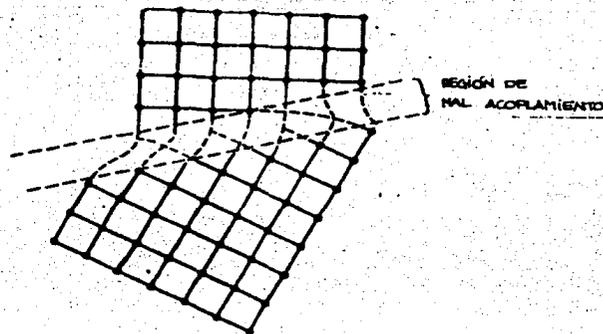


FIGURA # 8. REGION DE MAL ACOPLAMIENTO.

Bajo ciertas condiciones las zonas de mal acoplamiento son sumamente reactivas y se presenta la corrosión intergranular; la aleación se desintegra continuamente hasta que falla.

La corrosión intergranular puede ser causada por impurezas o por enriquecimiento o defecto de alguno de los constituyentes de la aleación en las zonas de mal acoplamiento.

En el acero inoxidable la corrosión intergranular puede presentarse cuando se calienta la aleación en un rango de temperatura de 510 a 790 C, se dice entonces que el metal se halla sensibilizado. A esta temperatura, el cromo (carburo de cromo $Cr_{23}C_6$) y el carbón contenido en la aleación son prácticamente insolubles, precipitándose el cromo en las zonas de mal acoplamiento (si el contenido de carbón en la aleación es mayor al 0.02%) y teniéndose como resultado una aleación con menor contenido en cromo en las áreas adyacentes a las zonas de mal acoplamiento.

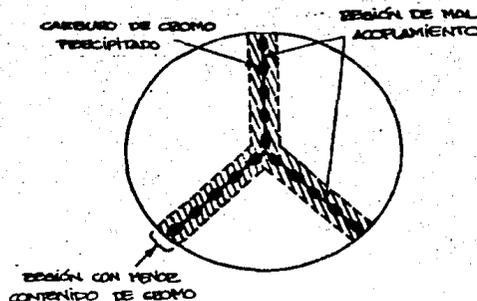


FIGURA # 9. CORROSION INTERGRANULAR.

Las zonas con menor contenido en cromo adyacentes a las zonas de mal acoplamiento son atacadas (generalmente se necesita más de un 10% de cromo en una aleación para considerar a un acero como inoxidable; si la proporción de cromo disminuye, también lo hará su resistencia a la corrosión) debido a que la resistencia a la corrosión ha disminuido en esa zona. Se tienen entonces dos metales con diferentes composiciones en contacto con una relación de áreas desfavorable (ánodo pequeño y cátodo grande) y el resultado es un ataque rápido en el área desprotegida.

7) ATAQUE SELECTIVO

Este tipo de ataque se caracteriza por ser uno de los constituyentes de determinada aleación el que se ve afectado. La selectividad y el grado de ataque estarán determinados por el medio ambiente, debiéndose tomar en cuenta la susceptibilidad de cada uno de los constituyentes de la aleación a determinado medio. El latón es un caso típico. Dicha aleación consiste en un 30% de zinc y 70% de cobre; cuando esta aleación es atacada (por ejemplo por agua caliente), es el zinc el constituyente que se ve afectado. Se ha aceptado un mecanismo que explica este fenómeno:

- 1) Disolución del metal.
- 2) Formación iones zinc en disolución, los cuales son más reactivos que los iones cobre. La aleación se debilita hasta que falla.

8) CORROSION - EROSION

Este tipo de ataque es causado por el movimiento relativo de un fluido corrosivo y la superficie metálica. Por lo general, este movimiento es rápido y el fenómeno de abrasión también está involucrado en este tipo de ataque.

La corrosión por erosión se caracteriza por la aparición de bordes, agujeros, zonas desgastadas, etc. y por lo general muestra un patrón direccional. En muchos casos las fallas en equipos debidas a este tipo de ataque ocurren en un periodo de tiempo relativamente corto; siendo muy difíciles de predecir ya que no se pueden correr pruebas experimentales muy exactas.

Muchos metales y aleaciones son susceptibles a daños por este tipo de ataque; la magnitud de los daños depende de la superficie y de la resistencia que esta tenga contra algún medio corrosivo específico.

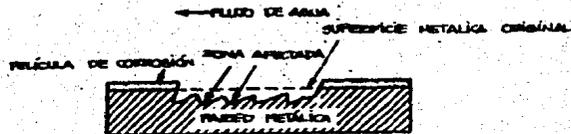


FIGURA # 10. CORROSION-EROSION EN LA PARED DE UN TUBO DE UN CONDENSADOR.

Muchos tipos de medios corrosivos pueden causar corrosión por erosión: gases, disoluciones acuosas, sistemas orgánicos, metales líquidos y sólidos en suspensión, los cuales son particularmente destructivos desde este punto de vista.

Todo tipo de equipos expuestos al movimiento de fluidos están sujetos a la corrosión por erosión: tuberías, bridas, codos, válvulas, bombas, etc.

La velocidad del medio tiene un papel determinante en este tipo de ataque; normalmente, a mayor velocidad del medio, mayor será el daño causado a la superficie metálica. En la tabla 4. se muestra el efecto que tiene el agua de mar a distintas velocidades sobre distintos metales y aleaciones.

TABLA # 4. CORROSION DE DISTINTOS METALES Y ALEACIONES CAUSADA POR AGUA DE MAR A DISTINTAS VELOCIDADES DE FLUJO.

MATERIAL	VELOCIDAD DE CORROSION mg/dm ² /dia		
	0.3 m/seg	1.22 m/seg	8.23 m/seg
Acero al carbón	34	72	254
Hierro fundido	45	-	270
Bronce silicón	1	2	343
Admiralty	2	20	170
Bronce hidráulico	4	1	339
Bronce G	7	2	180
Aluminio Bronce (10% Al)	5	-	236
Aluminio latón	2	-	105
90-10 Cu Ni (0.8% Fe)	5	-	99
70-30 Cu Ni (0.05% Fe)	2	-	199
70-30 Cu Ni (0.5% Fe)	<1	<1	39
Monel	<1	<4	4
Acero inoxidable 316	1	0	<1
Hastelloy C	0	-	0

Un incremento en la velocidad del fluido puede incrementar o reducir los daños causados por este ataque según sea el mecanismo de corrosión involucrado. En el acero, causará un incremento

debido a que el suministro de oxígeno, sales y otros compuestos aumenta, además la velocidad puede incrementar la velocidad de difusión de los iones involucrados. En el caso de que el substrato metálico se encuentre protegido por algún recubrimiento, entre mayor sea la velocidad del fluido corrosivo, mayor será el desgaste de la película protectora.

En algunos casos, un incremento en la velocidad podrá disminuir o prevenir los daños debidos a este tipo de ataque, ya que es más difícil que se deposite lama o suciedad lo cual podría causar corrosión cavernosa o en forma de hendidura. Generalmente, un incremento en la velocidad del fluido ocasiona un ataque más severo, aunque puede haber ocasiones en que los daños sean mínimos a ciertas velocidades, pero una vez que se ha alcanzado la velocidad crítica, los daños causados por este tipo de ataque aumentan considerablemente (en muchos de los casos citados en la tabla 4. esta velocidad crítica es de 27 ft/seg; en las aleaciones citadas en la parte inferior de la tabla, esta velocidad crítica es mayor de 27 ft/seg).

Muchas fallas debidas a este tipo de ataque ocurren en equipos debido a las condiciones de flujo que se presentan, por ejemplo, cuando existe flujo turbulento en tuberías, cambiadores de calor, impulsores, propelas, etc.

9) CORROSION BAJO TENSION (SCC)

Los esfuerzos mecánicos a los que son sometidos algunos equipos se manifiestan de alguna manera característica (fatiga, fallas por tensión, etc.); y la corrosión por su parte se puede manifestar en una de las formas antes descritas. La combinación de estos dos fenómenos produce resultados desastrosos.

Este ataque se manifiesta mediante agrietamientos causados simultáneamente por la presencia de un medio corrosivo específico y un esfuerzo de tensión. Durante la corrosión por esfuerzos la superficie metálica permanece virtualmente intacta, mientras que el ataque se presenta en las grietas formadas. Este agrietamiento tiene serias consecuencias, ya que puede debilitar seriamente al equipo afectado en relativamente poco tiempo, pudiéndose presentar este tipo de ataque dentro de rangos típicos de diseño de equipo (presiones normales de operación). Las variables más importantes que pueden causar este tipo de ataque son: temperatura, composición del electrolito, composición del metal, magnitud del esfuerzo y estructura metálica.

Entre mayor sea el esfuerzo aplicado, menor tiempo tardará en aparecer el agrietamiento; se han hecho estudios para poder determinar el esfuerzo mínimo con el cual se presenta este ataque. En algunos casos se han observado agrietamientos con sólo el 10% del esfuerzo máximo permisible, siendo cada caso muy particular.

Los esfuerzos que pueden ocasionar este tipo de ataque pueden ser debidos a cualquier causa: temperatura, soldadura o esfuerzos aplicados. Es por eso, que se ha observado este tipo de corrosión en equipos que no han sido sometidos a esfuerzos mecánicos externos muy grandes. No todos los sistemas metal-medio ambiente son propensos a sufrir este tipo de ataque; por ejemplo, se ha

observado que el acero inoxidable se agrieta en presencia de cloruros y cáusticos, pero no sufre ataque alguno en medios con amoníaco, ácido nítrico, sulfúrico, acético o agua pura.

Hasta el momento no se han podido determinar las variables que normalmente causarían este ataque en varias aleaciones. La corrosión por esfuerzos se sabe que se presenta en algunos medios acuosos, en ciertos metales líquidos, sales fundidas y líquidos inorgánicos no acuosos. La presencia de oxidantes normalmente puede tener una marcada influencia en la tendencia al agrietamiento; se ha observado que la presencia de oxígeno u otras especies oxidantes promueve el agrietamiento de aceros inoxidables austeníticos en disoluciones de cloruros, y si estas especies oxidantes son eliminadas, no ocurre este agrietamiento.

Como en el caso de muchas reacciones químicas, el agrietamiento causado por este tipo de ataque se incrementa al aumentar la temperatura. En algunos sistemas como las aleaciones de magnesio, el agrietamiento puede ocurrir a temperatura ambiente (en otros sistemas se requieren temperaturas de ebullición).

La fase en la cual se encuentre el medio agresor también resulta importante; en algunos casos aleaciones expuestas a un medio acuoso en una sola fase son atacadas en mucho menor grado que sistemas expuestos a las mismas condiciones de temperatura y esfuerzos aplicados pero expuestos a inmersión y vapores del medio en forma intermitente.

En la tabla # 5. se presentan algunos sistemas en los cuales se presenta este tipo de ataque.

TABLA # 5. AMBIENTES QUE PUEDEN CAUSAR CORROSION POR ESFUERZOS A CIERTOS METALES Y ALEACIONES.

ALEACIONES DE ALUMINIO:	Disoluciones de cloruro de sodio, agua oxigenada, agua de mar, aire y vapor de agua.
ALEACIONES DE COBRE:	Disoluciones y vapores de amoníaco, aminas, agua y vapor de agua.
ALEACIONES DE ORO:	Disoluciones de cloruro férrico, disoluciones de ácido acético.
INCONEL:	Disoluciones de sosa cáustica.
PLOMO:	Disoluciones de acetato de plomo.
ALEACIONES DE MAGNESIO:	Disoluciones de cloruro de sodio, cromato de potasio, atmósferas rurales y marinas, agua destilada.
MONEL:	Sosa cáustica fundida, ácido fluorhídrico, ácido hidrofúosilícico .
NIQUEL:	Sosa cáustica fundida.
ACEROS ORDINARIOS:	Disoluciones de sosa cáustica, disoluciones de sosa-silicato de sodio, disoluciones de nitrato de calcio, amonio y sodio, mezclas de ácidos (nítrico y sulfúrico), disoluciones de ácido cianhídrico, agua de mar, disoluciones ácidas de ácido sulfhídrico, agua de mar, aleaciones fundidas de sodio-plomo.

TABLA # 5 (continuación).

ACEROS INOXIDABLES:	Disoluciones Ácidas de cloruros de magnesio y bario, disoluciones de cloruro de sodio-agua oxigenada, condensados de aguas cloradas.
ALEACIONES DE TITANIO:	Acido nítrico fumante, disoluciones de ácido acético-clorhídrico, agua de mar.

El mecanismo de acción de este tipo de ataque no está del todo esclarecido, y la información más útil y confiable se ha obtenido experimentalmente.

La corrosión juega un papel muy importante en la formación de las grietas; una picadura, cuarteadura o cualquier discontinuidad en la superficie metálica puede actuar como un elevador de esfuerzos. La concentración de esfuerzos en la punta de la ranura es enorme y normalmente se observa que los agrietamientos causados por este tipo de ataque empiezan en la base de la picadura (se pueden encontrar deformaciones plásticas en regiones inmediatas a esta picadura debido a la concentración tan alta de esfuerzos, entonces la aleación puede volverse menos resistente al esfuerzo y a la corrosión); el agrietamiento sigue avanzando y debilita gradualmente al equipo hasta que este falla.

10) CORROSION POR HIDROGENO

Este tipo de corrosión está relacionado con el daño mecánico que sufre algún metal causado por la presencia o interacción de este con el hidrógeno. Esta forma de ataque puede clasificarse en tres tipos distintos:

- 1) Ampollamiento por hidrógeno.
- 2) Fragilización por hidrógeno.
- 3) Descarburización.

AMPOLLAMIENTO POR HIDROGENO: La presencia de este fenómeno es debida a la penetración del hidrógeno en el metal, teniendo como resultado deformaciones locales, y en casos extremos, la completa destrucción de la pared del recipiente. Si se analiza una sección de la pared de un tanque protegido mediante protección catódica (caso muy común) expuesto a la atmósfera, y este tanque contiene un electrolito ácido, en la parte interior del tanque se empieza a generar hidrógeno como resultado de la protección catódica.



En la superficie metálica, existe una concentración fija de átomos de hidrógeno y algunos de estos se difunden en el metal en lugar de combinarse para formar la molécula de hidrógeno. Si estos átomos de hidrógeno que se difunden a través del metal encontraran una cavidad en la estructura metálica, los átomos de hidrógeno se combinarían para formar la molécula; esta molécula ya no se puede difundir, provocando que la concentración y la presión en la cavidad aumenten, causando así graves daños a la pared del recipiente (la presión de equilibrio entre el hidrógeno molecular y el atómico es tan grande que puede ocasionar la ruptura de un gran número de materiales).

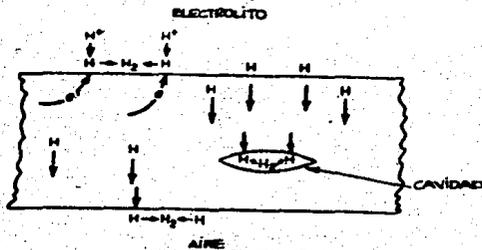


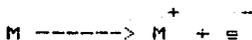
FIGURA # 11 AMPOLLAMIENTO POR HIDROGENO.

FRAGILIZACION POR HIDROGENO: Este fenómeno también es causado por la difusión del hidrógeno a través del metal, teniendo como resultado una pérdida en la ductilidad y resistencia a la tensión del material. El mecanismo de acción de este tipo de ataque no se conoce a fondo, pero se sabe que la causa inicial de este tipo de ataque es la misma que en el amollamiento por hidrógeno: penetración de hidrógeno atómico en la estructura metálica. La gran mayoría de las teorías que tratan de explicar este fenómeno, asocian la acumulación de hidrógeno en micro-cavidades.

Muchos investigadores han asociado los daños causados por corrosión por esfuerzos a la fragilización por hidrógeno, sin embargo estos dos tipos de ataque reaccionan de manera muy distinta ante diversas variables. La fragilización por hidrógeno se distingue de la corrosión por esfuerzos por el tipo de proceso electroquímico que se lleva a cabo.

Cuando se aplican corrientes anódicas y se observa que el crecimiento del agrietamiento se acelera, se considera que es un fenómeno de corrosión por esfuerzos en el que el proceso de disolución anódica contribuye a la formación de la grieta.

6)



Por otro lado, cuando el agrietamiento es acentuado por corrientes catódicas son atribuidos a la fragilización por hidrógeno. En la figura # 12 se presenta una comparación gráfica de ambos fenómenos.

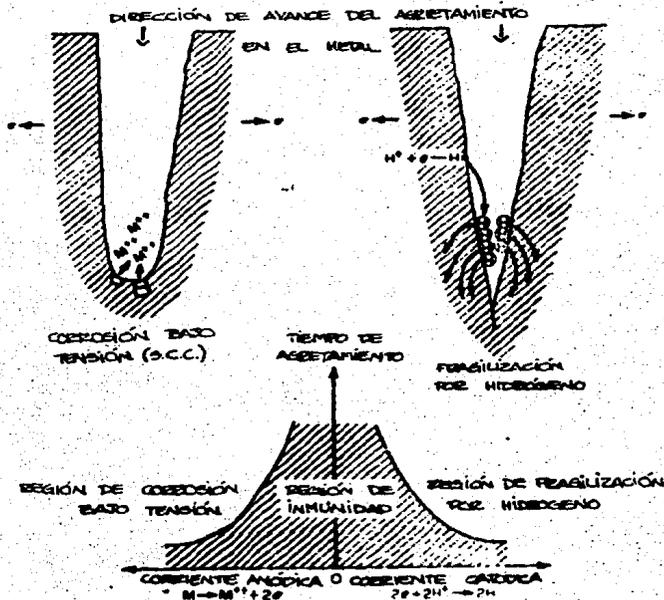


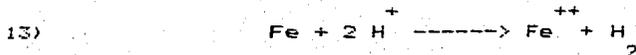
FIGURA # 12. CORROSIÓN POR ESFUERZOS Y FRAGILIZACIÓN POR HIDRÓGENO.

DESCARBURIZACIÓN: Este fenómeno se caracteriza por la remoción de carbón del acero, causada normalmente por hidrógeno a altas temperaturas y teniendo como efecto una disminución en la resistencia a la tensión del acero.

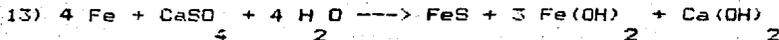
11) CORROSIÓN MICROBIOLÓGICA

Existen varias clases de microorganismos que pueden causar la corrosión de tuberías y otras estructuras de acero cuando están enterradas. Para que dicho ataque se lleve a cabo, se necesita que el suelo reúna ciertas características tales como: alto contenido de materia orgánica, presencia de sulfatos, tiosulfatos, sulfuros, carbonato ferroso y nitratos.

Los microorganismos anaeróbicos obtienen la energía necesaria para existir de la reducción de sulfatos a sulfuro de hidrógeno (se necesita materia orgánica para que actúe como donador de hidrógeno). Entonces, el hierro tiende a disolverse:



Los iones ferrosos formados reaccionan con el sulfuro de hidrógeno para producir sulfuro ferroso; también se tiene como producto final de la reacción hidróxido ferroso según la reacción:



Para existir, otros microorganismos utilizan nitratos o tiosulfatos, substancias que directa o indirectamente causan la corrosión en el acero.

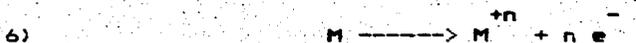
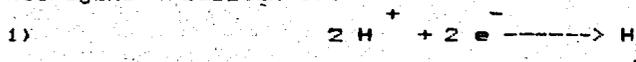
Existen también microorganismos aeróbicos que oxidan el sulfuro a sulfato produciéndose ácido sulfúrico, el cual además de atacar al acero acelera el proceso de corrosión. El color de los productos de corrosión normalmente es oscuro, condición que distingue a estos de los productos normales de cualquier tipo de ataque corrosivo antes mencionado.

III. PREVENCIÓN Y CONTROL DE LA CORROSIÓN.

Existen varias formas para controlar la corrosión en el acero, las cuales permiten que la vida útil de los equipos, estructuras, etc. se alarguen. La elección de un método determinado generalmente depende de las condiciones del medio y de factores económicos. Los principales métodos además de la protección mediante recubrimientos, que se mencionará más adelante son:

- PROTECCIÓN CATÓDICA
- PASIVACIÓN
- PROTECCIÓN ANÓDICA
- ALEACIONES

PROTECCIÓN CATÓDICA: El mecanismo de acción de este fenómeno se basa en el suministro de electrones a la parte metálica que se desea proteger; la adición de electrones a esta parte impedirá la disolución del metal (reacción 6) e incrementará la generación de hidrógeno (reacción 1).



Si se aplica una corriente directa al ánodo de igual o mayor magnitud que la corriente generada por el mecanismo de corrosión, la reacción anódica puede detenerse o revertirse, según sea la intensidad de la corriente aplicada. Bajo estas condiciones, la parte que en un proceso normal de corrosión sería anódica (acero), con este tipo de protección se vuelve catódica y por lo tanto no sufre ataque alguno.

Existen dos maneras de proteger catódicamente una estructura:

1) Mediante una corriente impresa por una fuente externa. La corriente aplicada puede provenir de rectificadores o generadores de corriente; una fuente externa de poder se puede conectar, por ejemplo, a un tanque enterrado. La terminal negativa de la fuente de poder se conecta al tanque y la positiva a un ánodo inerte como grafito o titanio platinado (normalmente se utiliza chatarra o grafito, aunque para medios marinos se utiliza plomo o titanio platinado).

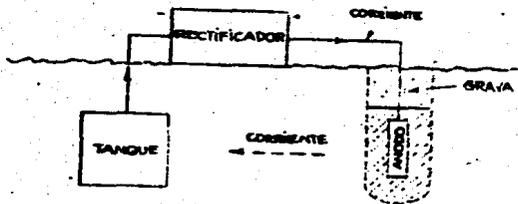


FIGURA # 13. PROTECCIÓN CATÓDICA MEDIANTE CORRIENTE IMPRESA DE UN TANQUE ENTERRADO.

TABLA # 6. COMPARACION DE ANODOS DE CORRIENTE INDUCIDA.

MATERIAL	APLICACIONES TÍPICAS	PÉRDIDA NORMAL (lb/año)
Chatahra	Inmersión en agua dulce o salada, equipos o estructuras bajo tierra.	10
Aluminio	Inmersión en agua dulce o salada, equipos o estructuras bajo tierra.	10-12
Grafito	Agua dulce, equipos o estructuras bajo tierra.	0.25-5.0
Acero con alto contenido en silicio y acero Si-Cr.	Inmersión en agua dulce o salada, equipos o estructuras bajo tierra.	0.25-1.0
Plomo	agua salada	0.1-0.25
Titanio platinado	agua salada	trazas

2) Mediante un acoplamiento galvánico. Teóricamente, cualquier metal de la serie F.E.M. que sea menos noble que el acero puede usarse como ánodo de sacrificio; se le llama de este modo porque éste se consume durante la protección del metal. Normalmente se utiliza magnesio o zinc como ánodos de sacrificio.

El ánodo de sacrificio más usado es el de magnesio, debido a su potencial tan negativo (-2.363 volts vs. electrodo normal de hidrógeno), aunque su eficiencia sea baja (50% aproximadamente).

Las estructuras metálicas expuestas a ambientes propicios para que se lleve a cabo la corrosión (tuberías enterradas, estructuras expuestas a la humedad, plataformas de petróleo, etc.) quedarán protegidas si se establece una diferencia de potencial (polarización) de -0.85 volts contra un electrodo de referencia de cobre/sulfato de cobre (se elige este electrodo por ser barato, exacto y de fácil manejo). El potencial de la estructura puede determinarse con un voltímetro, y la densidad de corriente catódica necesaria para polarizar la estructura puede calcularse sin problema.

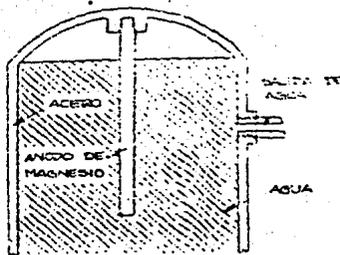


FIGURA # 14. PROTECCION CATODICA DE UN TANQUE USANDO UN ANODO DE SACRIFICIO.

TABLA # 7. REQUERIMIENTOS TIPICOS PARA PROTECCION CATODICA DEL ACERO.

ESTRUCTURA	MEDIO AMBIENTE.	CONDICIONES	DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/ft ²)
Tanque	ácido sulfúrico caliente	estático	50,000
Tuberías y tanques de almacenamiento.	tierra	estático	1-3
Tuberías	agua corriente	flujo	5-10
Calentadores de agua	agua caliente	flujo lento	1-3
Varillas de refuerzo	concreto	estático	0.1-0.5

TABLA # 8. COMPARACION DE DIVERSOS ANODOS DE SACRIFICIO.

	MAGNESIO	ZINC	ALUMINIO-ESTANO
CONSUMO TEORICO (lb/A-año)	9	23	6.5
CONSUMO REAL (lb/A-año)	18	25	16-20
POTENCIAL VS. Cu/CuSO ₄	-1.7	-1.15	-1.3

4

Normalmente, en sistemas de protección catódica pueden encontrarse corrientes parásitas (corrientes extrañas en la tierra). Si se coloca un objeto metálico en un campo eléctrico fuerte, se genera una diferencia de potencial en este y el fenómeno de corrosión se lleva a cabo en los puntos en los que la corriente abandona el objeto y entra a la tierra. Este problema se acentúa en zonas donde exista un gran número de tuberías enterradas (refinerías, zonas industriales, etc.).

PASIVACION: Este fenómeno se observa durante la corrosión de algunos metales y aleaciones; se puede definir como la pérdida de reactividad química bajo ciertas condiciones específicas. Este fenómeno es un tanto cuanto difícil de definir debido a su naturaleza tan compleja y a las condiciones tan específicas bajo las cuales ocurre.

Si se estudia el comportamiento del acero inmerso en una disolución ácida concentrada (HNO_3 70%) sin aire, no se observará reacción de disolución alguna. Si se agrega agua, diluyendo la disolución hasta un 50%, el sistema seguirá sin sufrir cambio alguno. Sin embargo, si este sistema se agita vigorosamente o se raya la superficie del acero con un vidrio, se observará una rápida disolución del metal y un efecto similar si el acero se introduce directamente en ácido nítrico diluido.

En la figura # 15 se ilustra este fenómeno. Ambos metales se encuentran inmersos en una disolución ácida de igual concentración; uno se disuelve rápidamente mientras que el otro permanece sin cambio alguno; se dice entonces que este último se encuentra en estado pasivo.

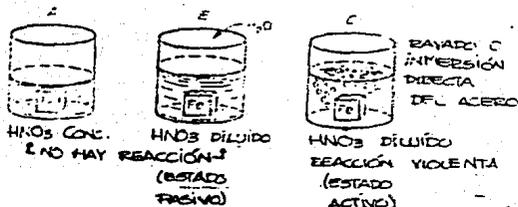


FIGURA # 15. PASIVACION DEL ACERO EN ACIDO NITRICO.

La figura # 15 muestra el comportamiento típico que exhibe un metal bajo estos efectos; este comportamiento puede representarse en tres secciones: activa, pasiva y transpasiva. En la región activa, el comportamiento del metal no tiene nada de sorprendente; a medida que aumenta el poder oxidante de la disolución, lo hace también la velocidad de corrosión.

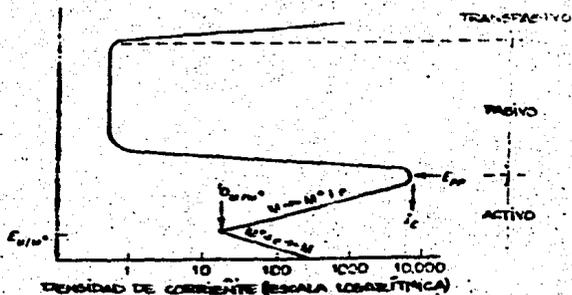


FIGURA # 16. CURVA DE POLARIZACION ANÓDICA DE UN METAL ACTIVO-PASIVO.

Llega un momento en que si se sigue aumentando el poder oxidante (potencial) de la disolución, la velocidad de corrosión sufre una disminución repentina y considerable (región pasiva) y aumentos posteriores en el poder oxidante de la disolución producen un cambio mínimo en la velocidad de corrosión del metal.

Finalmente, a concentraciones muy elevadas, o en presencia de oxidantes muy fuertes, la velocidad de corrosión se incrementa a medida que lo hace el poder oxidante; esta es la región transpasiva. Es importante hacer notar que durante la transición de la región activa a la región pasiva, se observa una disminución considerable en la velocidad de corrosión. La causa precisa todavía no ha quedado debidamente explicada, aunque se cree que es un caso especial de polarización por activación debida a la formación de una barrera protectora extremadamente delicada, la cual es estable dentro de un intervalo de poder oxidante alto, y que se destruye en presencia de oxidantes muy fuertes.

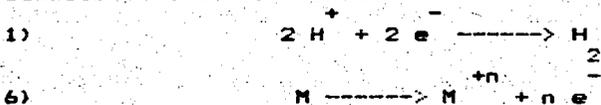
Desde un punto de vista ingenieril, la protección anódica ofrece una protección única contra la corrosión en medios sumamente agresivos, aunque debe tenerse mucha precaución, ya que existe la posibilidad de pasar de la región pasiva a la transpasiva (exceso de oxidantes, golpes, rayaduras, etc.). Se piensa que este fenómeno es debido a una película superficial de aproximadamente 30 angstrom de espesor, la cual es extremadamente delicada.

Existe una gran variedad de metales que siguen este comportamiento, pero para fines prácticos, los metales comerciales que presentan este fenómeno son acero, titanio, cromo y níquel.

Una de las características importantes de un metal activo-pasivo es su correspondiente densidad máxima de corriente anódica; determinado por el potencial de pasivación (E_{pp}) y la densidad de corriente anódica crítica para pasivación (i_c) corriente anódica (ver figura # 16).

En resumen, metales que poseen una transición activa-pasiva, pueden volverse pasivos o muy resistentes a la corrosión en disoluciones con un determinado poder oxidante; bajo condiciones extremadamente severas estos metales pierden sus características protectoras y ya no son resistentes a la corrosión.

PROTECCION ANODICA: El mecanismo de protección anódica está basado en la formación de una película protectora sobre algún metal mediante aplicación de corrientes anódicas. Si se consideran las reacciones:



Puede pensarse que la aplicación de una corriente anódica a una estructura metálica tendería a aumentar la velocidad de corrosión del metal y disminuir la velocidad de generación de hidrógeno; normalmente esto ocurre excepto en metales con transiciones activo-pasivo como el níquel, acero, cromo, titanio y sus aleaciones.

Si se aplican corrientes anódicas cuidadosamente controladas a estos materiales, estos se pasivan y la velocidad de disolución del metal disminuye considerablemente.

Para proteger anódicamente una estructura se requiere un dispositivo llamado potencióstato; este aparato tiene la función de mantener una diferencia de potencial constante con respecto a un electrodo de referencia.

En la figura # 17 se ilustra la protección anódica de un tanque de acero que contiene ácido sulfúrico; el potencióstato tiene tres terminales; una está conectada al tanque, otra a un cátodo auxiliar (electrodo de platino), y la tercera a un electrodo de referencia (calomel). Durante este proceso, el potencióstato mantiene una diferencia de potencial constante entre el tanque y el electrodo de referencia (el potencial óptimo para protección se determina mediante mediciones electroquímicas basadas en la correspondiente curva de polarización anódica).

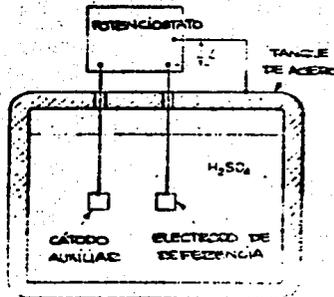


FIGURA # 17. PROTECCION ANODICA DE UN TANQUE DE ACERO.

En la tabla # 9 , se listan las velocidades de corrosión de acero inoxidable austenítico en disoluciones de ácido sulfúrico conteniendo iones cloruro contando con y sin protección anódica.

TABLA # 9. PROTECCION ANODICA DE ACERO INOXIDABLE AUSTENITICO A 30 C.

ALEACION	MEDIO AMBIENTE	VELOCIDAD DE CORROSION: (mpy)	
		DESPROTEGIDO	PROTEGIDO
304 (19Cr-9Ni)	H ₂ SO ₄ 1N + NaCl 10 M	14	0.025
	H ₂ SO ₄ 1N + NaCl 10 M	2.9	0.045
	H ₂ SO ₄ 1N + NaCl 10 M	3.2	0.20
	H ₂ SO ₄ 10N + NaCl 10 M	1930	0.016
	H ₂ SO ₄ 10N + NaCl 10 M	1125	0.04
	H ₂ SO ₄ 10N + NaCl 10 M	77	0.21

En la tabla # 10, se listan los requerimientos de corriente para proteger anódicamente al acero inoxidable austenítico 304 (19Cr-9Ni).

TABLA # 10. REQUERIMIENTOS DE CORRIENTE PARA PROTECCION ANODICA. FLUIDO Y TEMPERATURA DENSIDAD DE CORRIENTE (mA/ft²)

CONCENTRACION	(F)	METAL	PARA PASIVAR	PARA MANTENER
H ₂ SO ₄				
1 molar	75	316 SS	2100	11
15%	75	304	390	67
30%	75	304	500	22
45%	150	304	165,000	830
67%	75	304	4700	3.6
67%	75	316	470	0.09
67%	75	Carpenter 20	400	0.8
93%	75	acero dulce	260	21
Oleum	75	acero dulce	4400	11
H ₃ PO ₄				
75%	75	acero dulce	38,000	19,000
115%	180	304 SS	0.03	0.00014
NaOH				
20%	75	304 SS	3400	9.4

Existen algunas diferencias entre la protección catódica y anódica; cada método tiene sus ventajas y desventajas; algunas de las cuales se citan en la tabla # 11.

TABLA # 11. COMPARACION DE PROTECCION CATODICA Y ANODICA

	PROTECCION ANODICA	PROTECCION CATODICA
Aplicabilidad a metales	Metales activos-pasivos solamente.	Todo tipo de metales
Agresividad del medio	débil a agresivo	débil a moderado
Costo relativo		
Instalación	alto	bajo
Operación	muy bajo	medio a alto

La protección anódica tiene ventajas bastante peculiares; la corriente aplicada normalmente es igual a la velocidad de corrosión del sistema protegido; esto además de proteger al metal, significa un continuo muestreo de la velocidad de corrosión. Por otra parte, las condiciones de operación para la protección anódica pueden establecerse con precisión mediante mediciones de polarización en un laboratorio.

En cambio, para sistemas protegidos catódicamente, normalmente los límites de operación se establecen mediante ensayos de prueba y error (aunque existan métodos para evaluar rápidamente las necesidades de corriente que pueda requerir determinado sistema).

ALEACIONES: El acero al carbón normalmente se combina con cromo, níquel, cobre, molibdeno, fosfatos, y vanadio en determinadas proporciones para formar aleaciones.

La razón principal por la que existen los aceros inoxidable es por su resistencia a la corrosión. Dicha resistencia normalmente se incrementa a medida que aumentan las proporciones de níquel y cromo en la aleación. Existe una gran variedad de aceros inoxidable debido a las diferentes características de cada uno de ellos (resistencia a la corrosión, propiedades mecánicas y costo). En la tabla # 12 se listan las composiciones de los diversos tipos de aceros inoxidable más comunes y los grupos a los que pertenecen.

El grupo I pertenece a aceros inoxidable martensíticos, estos pueden endurecer mediante un tratamiento térmico similar al del acero ordinario. Este tipo de materiales posee una resistencia mecánica y dureza mayor, y una ductilidad menor a la del acero ordinario. La resistencia a la corrosión es menor a la de los materiales de los grupos II y III. Los aceros martensíticos pueden someterse a un tratamiento térmico para obtener una aleación más resistente y poder soportar grandes esfuerzos por tensión; se ha observado que la resistencia a la corrosión es mayor en aceros martensíticos duros (tratados).

Los aceros del grupo II (ferríticos) son aceros que no pueden ser endurecidos mediante un tratamiento térmico (únicamente en frío), poseen buena resistencia a la corrosión atmosférica y una excelente resistencia a la corrosión bajo tensión (sc). Se utilizan en medios acuosos clorados; ambientes donde los aceros inoxidable más comunes (18-8) fallan.

TABLA * 12. COMPOSICION QUIMICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES.

TIPO (AISI)	%C	%Cr	%Ni	% OTROS ELEMENTOS
GRUPO I. ACEROS MARTENSITICOS.				
410	0.15 max.	11.5-13.5	-	-
416	0.15 max.	12-14	-	Se, Mo, o Zn
420	0.35-0.45	12-14	-	-
431	0.20 max.	15-17	1.25-2.5	-
440 A	0.60-0.75	16-18	-	-
GRUPO II. ACEROS FERRITICOS.				
405	0.08 max.	11.5-14.5	0.5 max.	0.1-0.3 Al
430	0.12 max.	14-18	0.5 max.	-
442	0.25 max.	16-23	0.5 max.	-
446	0.20 max.	23-27	0.5 max.	0.25 N max.
GRUPO III. ACEROS AUSTENITICOS.				
201	0.15 max.	16-18	3.5-5.5	5.0-7.5 Mn 0.25 N
202	0.15 max.	17-19	4-6	7.5-10 Mn 0.25 N
301	0.15 max.	16-18	6-8	2 Mn max.
302	0.15 max.	17-19	8-10	2 Mn max.
302 B	0.15 max.	17-19	8-10	2-3 Si
304	0.08 max.	18-20	8-12	1 Si max.
304 L	0.03 max.	18-20	8-12	1 Si max.
308	0.08 max.	19-21	10-12	1 Si max.
309	0.20 max.	22-24	12-15	1 Si max.
309 S	0.08 max.	22-24	12-15	1 Si max.
310	0.25 max.	24-26	19-22	1.5 Si max.
310 S	0.08 max.	24-26	19-22	1.5 Si max.
314	0.25 max.	23-26	19-22	1.5-3.0 Si
316	0.10 max.	16-18	10-14	2-3 Mo
316 L	0.03 max.	16-18	10-14	2-3 Mo
317	0.08 max.	18-20	11-14	3-4 Mo
321	0.08 max.	17-19	8-11	Ti, C
347	0.08 max.	17-19	9-13	Cb, Ta, C
Alloy 20	0.07 max.	29	20	3.25 Cu, 2.0 Mo
GRUPO IV. ACEROS ENDURECIDOS POR EL TIEMPO.				
322	0.07	17	7	0.07 Ti, 0.2 Al
17-7PH*	0.07	17	7	1.0 Al
17-4PH*	0.05	16.5	4.25	4.0 Cu
14-8MoPH*	0.05	14	8.5	2.5 Mo, 1% Al
AM350*	0.10	16.5	4.3	2.75 Mo
CD4MCu	0.03	25	5	3.0 Cu, 2.0 Mo

* designaciones comerciales

El grupo III corresponde a aceros austeníticos; estos materiales son no magnéticos y tampoco pueden ser endurecidos mediante tratamientos térmicos (únicamente en frío). Muchos de estos aceros contienen níquel como principal formador austenítico, aunque otros además contienen manganeso.

Los aceros austeníticos son los que tienen la mejor resistencia a la corrosión, por esta razón son los que se especifican para condiciones de exposición muy agresivas (atmósferas marinas, industriales, etc.).

Los materiales incluidos en el grupo IV son aceros endurecidos por el tiempo o por precipitación. Normalmente son materiales que han sido endurecidos mediante un tratamiento de solubilización-enfriamiento repentino seguido por un calentamiento repetido a temperaturas entre 430 C y 540 C.

La resistencia a la corrosión de estos materiales normalmente es menor a la de los aceros 18-8, excepto para el CD-4MCu el cual posee la mejor resistencia contra la corrosión entre todos los aceros antes mencionados.

Existen materiales con excelente resistencia a la corrosión; estos son los aceros fundidos con alto contenido en silicio (14% como mínimo); de hecho, estos materiales son los más conocidos entre los metales y aleaciones comerciales resistentes a la corrosión. Estos materiales poseen una gran resistencia contra la corrosión debido a la formación de capas superficiales de SiO₂, las cuales tienen un efecto pasivante y se forman durante la exposición del metal al medio ambiente. Como principal inconveniente, es importante mencionar que estos materiales son difíciles de soldar, es por eso que estos aceros sólo se recomiendan para tuberías y otras aplicaciones en donde el proceso de soldadura no presente un alto grado de dificultad.

IV. PROTECCION CON RECUBRIMIENTOS.

IV.1. VEHICULOS Y PIGMENTOS INHIBIDORES DE CORROSION.

El fenómeno de corrosión es un proceso electroquímico que involucra la interacción de un metal con su medio ambiente. Este fenómeno puede retardarse o prevenirse por medio de una película impermeable a los factores corrosivos de determinado medio ambiente. Un recubrimiento que reúna estas características por completo no existe, es por eso que normalmente hay una gran variedad de recubrimientos para cada medio ambiente en particular.

Un componente de vital importancia en un recubrimiento es el vehículo o formador de película; para efectos de protección contra la corrosión se necesita una película muy poco permeable al agua y al oxígeno o gases industriales, dicho de otra manera, un recubrimiento tendrá un mayor grado de protección contra la corrosión mientras menor sea la permeabilidad al agua y a determinados gases de la película en cuestión.

A continuación se listan los recubrimientos más usados para protección contra la corrosión.

Tabla # 13. FORMADORES DE PELICULA MAS COMUNES.

- RECUBRIMIENTOS VINILICOS
- RECUBRIMIENTOS EPOXY-POLIAMIDA
- RECUBRIMIENTOS EPOXY-POLIAMIDA-ALQUITRAN DE HULLA
- RECUBRIMIENTOS DE HULE CLORADO

RECUBRIMIENTOS VINILICOS: Son sistemas de secado rápido, con baja permeabilidad al vapor de agua y buena adherencia a sustratos metálicos tratados con chorro de arena a metal blanco (especificación SAE 2 1/2; PEMEX-LA-80 inciso a).

El espesor seco óptimo de este tipo de recubrimientos es de 2 a 3 milésimas de pulgada (50 - 75 micrómetros) como primario y 6 milésimas de pulgada (150 micrómetros) como acabado en ambientes marinos.

RECUBRIMIENTOS EPOXY-POLIAMIDA: Este tipo de sistemas normalmente destacan por su excelente adhesión, durabilidad, dureza y resistencia al vapor de agua, agua dulce o salada y gran número de agentes químicos.

Los recubrimientos epóxicos curan o endurecen por reacción química, esto quiere decir que para poder poner en servicio de inmersión una embarcación, plataforma, tubería o equipo, hay que esperar aproximadamente 7 días si el periodo de endurecimiento se llevó a cabo a temperatura ambiente.

La preparación que debe llevar la superficie no es tan crítica como en el caso de los recubrimientos vinilicos; en muchas ocasiones basta con una limpieza manual (especificación PEMEX-LM-80), aunque para servicio de inmersión si es necesaria una limpieza con abrasivo a metal blanco (especificación SAE 2 1/2 ó PEMEX-LA-80 inciso a).

El espesor seco óptimo de este tipo de recubrimientos es de 2 - 3 milésimas de pulgada (50 - 75 micrómetros) como primario y 4 a 10 milésimas de pulgada (100 - 250 micrómetros) como acabado.

RECUBRIMIENTOS EPOXY-POLIAMIDA-ALQUITRAN DE HULLA: En estos sistemas se combinan las ventajas antes descritas de los sistemas epoxy-poliamida con las ventajas del alquitran de hulla (excelente adhesión, gran flexibilidad y mínima permeabilidad al agua) para formar recubrimientos de alta calidad.

La preparación que debe llevar la superficie no es tan crítica; en muchas ocasiones basta con una limpieza manual (especificación PEMEX-LM-80), aunque para servicio de inmersión si es necesaria una limpieza con abrasivo a metal blanco (especificación SAE 2 1/2 ó PEMEX-LA-80 inciso a).

Se recomienda un espesor seco de 16 a 20 milésimas de pulgada (400 - 500 micrómetros); se utilizan solamente como primarios formando películas de alto espesor.

RECUBRIMIENTOS DE HULE CLORADO: Son sistemas de secado rápido muy resistentes a base de una resina de hule clorado plastificada; poseen una excelente adhesión, resistencia al agua dulce o salada y vapor de agua (debido a su muy baja permeabilidad) y una muy buena resistencia química.

La preparación que debe llevar el sustrato metálico es variable, en muchas ocasiones basta con una limpieza manual (especificación PEMEX-LM-80), aunque para servicio de inmersión si es necesaria una limpieza con abrasivo a metal blanco (especificación SAE 2 1/2 ó PEMEX-LA-80 inciso a).

El espesor seco óptimo para este tipo de sistemas es de 3 milésimas de pulgada (75 micrómetros) como primario y 4 milésimas de pulgada como acabado (100 micrómetros).

El componente más importante de un recubrimiento es el formador de película; para propósitos de protección contra la corrosión existen otros componentes de suma importancia en un recubrimiento: los inhibidores de corrosión. Dichos compuestos normalmente son pigmentos que poseen la capacidad de impedir o retardar el ataque corrosivo del medio ambiente a un determinado sustrato metálico. En la tabla # 14 se listan los pigmentos inhibidores de corrosión más comunes.

TABLA # 14. PIGMENTOS INHIBIDORES DE CORROSION.

- MINIO.
- CROMATOS DE ZINC.
- CROMATO DE ESTRONCIO.
- FOSFATO DE ZINC.
- POLVO DE ZINC METALICO.
- OXIDOS DE HIERRO.

MINIO: Existen evidencias de que este pigmento (Fe₃O₄) tiene propiedades inhibitoras. Esto es debido a la naturaleza alcalina del pigmento y a su alto poder oxidante. El mecanismo de acción de este pigmento inhibitor es como sigue: Debido a su alta alcalinidad, provee de iones hidróxido a las vecindades inmediatas a las áreas anódicas, de tal manera que el hidróxido ferroso formado puede permanecer en contacto con el metal. En su papel de agente oxidante, favorece la oxidación del hidróxido ferroso para formar el hidróxido férrico hidratado, el cual se deposita en las áreas anódicas formando una película delgada, densa y muy adherente, impidiendo así el progreso de la reacción en la región anódica y por consiguiente el proceso de corrosión. Dicho de otra manera, el mecanismo de protección contra la corrosión de este inhibidor está basado en la polarización anódica.

El minio es un pigmento que se utiliza en algunos recubrimientos especificados por PEMEX, dichos recubrimientos se listan en la tabla # 15.

TABLA # 15. ESPECIFICACIONES DE PEMEX QUE CONTIENEN MINIO COMO INHIBIDOR DE CORROSION.

ESPECIFICACION	DESCRIPCION
PEMEX-RP-1	Primario alquidálico de minio.
PEMEX-RP-7-80	Primario vinil-epóxico modificado.

CROMATOS DE ZINC: La acción anticorrosiva de estos pigmentos se basa en el suministro de iones cromato, ya que el cromato de zinc es ligeramente soluble en agua (la solubilidad del cromato básico de zinc es de 0.02 g/litro, y la del amarillo de zinc es de 1.1 g/litro). Los iones cromato formados son los que controlan la corrosión, ya que ejercen una acción pasivante formando así una película protectora en las áreas anódicas la cual impide la reacción anódica y por consiguiente el proceso de corrosión. Es importante mencionar que para que exista una protección eficiente y duradera, debe haber una concentración determinada de iones cromato, dicha concentración quedará determinada por la solubilidad y cantidad de pigmento en el recubrimiento protector. El amarillo de zinc se utiliza en varias formulaciones especificadas por PEMEX; en la tabla # 16 se listan estos recubrimientos.

TABLA # 16. ESPECIFICACIONES DE PEMEX QUE CONTIENEN CROMATO DE ZINC COMO INHIBIDOR DE CORROSION.

ESPECIFICACION	DESCRIPCION
PEMEX-RP-2-80	Primario de cromato de zinc, vinil-alquidálico
PEMEX-RP-6-80	Primario epóxico catalizado.
PEMEX-RP-9-80	Primario de hula clorado.

CROMATO DE ESTRONCIO: Este pigmento es menos soluble en agua que el amarillo de zinc, pero mucho más soluble que el cromato básico de zinc (0.6 g/litro). La acción inhibitoria de este pigmento también se basa en el suministro de iones cromato para lograr un efecto pasivante en la región anódica. Aunque el cromato de estroncio es mucho más caro que el cromato de zinc, este pigmento se utiliza en países donde el uso del cromato de zinc está restringido por ser un agente cancerígeno.

FOSFATO DE ZINC: Sometido a pruebas aceleradas de laboratorio (cámara de niebla salina), este pigmento no exhibe una actividad electroquímica significativa; los recubrimientos con fosfato de zinc como inhibidor de corrosión muestran un comportamiento menos eficiente que los recubrimientos que contengan otros inhibidores (cromato de zinc, minio). La razón de este comportamiento tan pobre es que el fosfato de zinc requiere de un mayor tiempo para formar su película protectora, aunque pruebas de campo y exposición prolongada demuestran que este pigmento es tan eficiente como el cromato de zinc.

POLVO DE ZINC METÁLICO: Teóricamente, cualquier metal que sea menos noble que el acero debería funcionar como un inhibidor de corrosión cuando este se use en forma de polvo metálico; dentro de estos metales se podría incluir a los siguientes: magnesio, aluminio y zinc. Actualmente, es el zinc el único metal que ha demostrado ser un inhibidor de corrosión eficiente, ya que el magnesio y el aluminio se oxidan rápidamente, lo cual impide que estos metales protejan catódicamente al acero.

Es importante señalar que este tipo de recubrimientos deben contener una cantidad de pigmento tal, que permita el contacto eléctrico entre las partículas de zinc y el acero. Mediante mediciones de resistividad, se ha determinado que el porcentaje de polvo de zinc en la película no debe ser menor al 80% en peso. En la tabla # 17 se listan los recubrimientos especificados por PEMEX que contienen polvo de zinc metálico.

TABLA # 17. ESPECIFICACIONES DE PEMEX QUE CONTIENEN POLVO DE ZINC METÁLICO COMO INHIBIDOR DE CORROSION.

ESPECIFICACION	DESCRIPCION
PEMEX-RP-3-80	Primario de zinc 100% inorgánico postcurado.
PEMEX-RP-4-A-80	Primario de zinc 100% inorgánico autocurante base acuosa.
PEMEX-RP-4-B-80	Primario de zinc 100% inorgánico autocurante base solvente.

OXIDOS DE HIERRO: Estos pigmentos (rojo, negro y amarillo óxido) se encuentran en una gran variedad de primarios. Recubrimientos pigmentados únicamente con óxido de hierro son relativamente impermeables a la humedad y a diversos agentes corrosivos y ofrecen una buena protección contra la corrosión mientras la película que forma este recubrimiento permanezca intacta; una vez que esta ha sufrido algún daño (cuarteaduras, empujamientos, etc.), el área desprotegida se vuelve anódica, permitiendo así que la corrosión en dicha área proceda rápidamente.

IV.2. DIVERSOS TIPOS DE RECUBRIMIENTOS CONTRA LA CORROSION.

En la actualidad existe una gran variedad de recubrimientos protectores contra la corrosión. PEMEX desde hace tiempo, se ha preocupado por proteger sus equipos e instalaciones con recubrimientos que satisfagan determinadas normas de calidad, para efectos prácticos, y con el fin de que exista un conocimiento más a fondo de estos recubrimientos en el presente trabajo se mencionarán únicamente recubrimientos especificados por PEMEX.

Los recubrimientos que tienen mayor demanda para propósitos de protección contra la corrosión se listan en la tabla # 18.

TABLA # 18. DIVERSOS TIPOS DE RECUBRIMIENTOS PROTECTORES CONTRA LA CORROSION.

ESPECIFICACION	DESCRIPCION
PEMEX-RP-3-80	Primario de zinc 100% inorgánico postcurado.
PEMEX-RP-4-B-80	Primario de zinc 100% inorgánico autocurante base solvente.
PEMEX-RP-5-B-80	Primario de alquitrán de hulla epóxico poliamicido.
PEMEX-RP-6-80	Primario epóxico catalizado.
PEMEX-RP-7-80	Primario vinil-epóxico modificado.
PEMEX-RP-9-80	Primario de hule clorado.

PEMEX-RP-3-80: Esta especificación se refiere a un primario 100% inorgánico de zinc cuyo curado se efectúa mediante la aplicación de una solución curadora ácida después de aplicado el recubrimiento. Este primario es sumamente duro y resistente a la abrasión, a los ambientes salino, marino, húmedo con o sin salinidad y gases derivados del azufre, a los destilados tratados y a los aromáticos, con excepción de hidrocarburos clorados en presencia de humedad. Se aplicará sobre superficies de acero limpiadas con chorro de abrasivo a metal blanco (especificación PEMEX LA-80 inciso a) este recubrimiento puede usarse sin acabado, aunque en caso de requerirse se recomiendan acabados vinílicos (previa aplicación de un enlace vinil-epóxico) o acabados epóxicos.

PEMEX-RP-4-B-80: El desarrollo y formulación de este recubrimiento es el objetivo del presente trabajo; como se mencionó inicialmente, este recubrimiento es un primario de zinc 100% inorgánico autocurante. Está constituido por un pigmento de polvo fino de zinc y un vehículo a base de un silicato orgánico parcialmente hidrolizado; ambos componentes se envasan por separado y se mezclan justo antes de aplicar el recubrimiento.

Este recubrimiento es sumamente duro y resistente a la abrasión, con excelente resistencia a la mayoría de los solventes, a los ambientes húmedo, salino y marino, con excepción de hidrocarburos clorados en presencia de humedad. Se considera que la vida de este recubrimiento es menor a la del poscurado (RP-3-80), sin embargo, se recomienda para instalaciones expuestas a un alto porcentaje de humedad, a salpicaduras y brisa marina al aplicarse. Este recubrimiento deberá aplicarse sobre superficies metálicas de hierro o acero limpiadas previamente con chorro de abrasivo a metal blanco (especificación PEMEX LA-80 inciso a). Deberá aplicarse a un espesor de película seca de 2 a 3 milésimas de pulgada (51 a 75 micrómetros). Sobre este primario se pueden usar acabados epóxicos, vinílicos y vinil-acrílicos previa aplicación de un enlace vinil-epóxico en el caso de los dos últimos.

PEMEX-RP-5-B-80: Esta especificación se refiere a un primario de alquitrán de hulla-epóxico catalizado con poliamidas. Tiene un alto contenido de sólidos por volumen, y una vez curado, forma una película dura y flexible, resistente al agua salada, agua cruda y tratada, petróleo crudo y combustible para inmersión continua a una temperatura máxima de 70 C. Este recubrimiento puede aplicarse sobre superficies metálicas previa limpieza con chorro de abrasivo tipo comercial; aunque para servicio de inmersión la superficie deberá ser limpiada con chorro de abrasivo a metal blanco. El espesor de película seca recomendado es de 16 a 20 milésimas de pulgada (400 a 510 micrómetros). Este recubrimiento normalmente no necesita ningún tipo de acabado.

PEMEX-RP-6-80: Esta especificación se refiere a un primario epóxico catalizado con poliamidas con cromato de zinc como inhibidor de corrosión. Posee una excelente adherencia y resistencia al ambiente húmedo con o sin salinidad y gases derivados del azufre y a los destilados sin tratar, su resistencia a aromáticos es limitada. Este recubrimiento se aplicará sobre superficies metálicas de acero previa limpieza con chorro de abrasivo con acabado a metal blanco o comercial (según norma PEMEX 2.132.01.). El espesor seco de película recomendado es de 2 milésimas de pulgada (51 micrómetros). Como acabado se pueden utilizar recubrimientos epóxicos o poliuretano.

PEMEX-RP-7-80: Esta especificación se refiere a un primario a base de minio como pigmento inhibidor de corrosión y un vehículo vinílico con modificación de ester epóxico como formador de película. Tiene una excepcional adherencia y una excelente capacidad para detener la corrosión bajo película; es resistente al ambiente húmedo con o sin salinidad y gases derivados del azufre. Resiste inmersión en agua dulce o salada. Se usará sobre superficies de acero limpiadas con chorro de abrasivo con acabado tipo comercial. El espesor seco de película recomendado es de 1.5 milésimas de pulgada (38 micrómetros). Como acabados se usan recubrimientos vinílicos preferentemente.

PEMEX-RP-9-80: Esta especificación se refiere a un primario a base de cromato de zinc como inhibidor de corrosión y un vehículo a base de resinas de hule clorado plastificado como formador de película. Tiene buenas características inhibitoras en ambientes húmedos con o sin salinidad y gases derivados del azufre. Es resistente a atmósferas corrosivas ácidas y alcalinas, a detergentes y a ciertos oxidantes; tiene excelente adherencia sobre concreto y acero, se recomienda su uso en estructuras continuamente húmedas o sumergidas en agua dulce o salada. Cuando se aplique sobre superficies metálicas, estas deberán estar limpiadas con chorro de abrasivos a metal blanco. El espesor seco de película recomendado es de 1.5 milésimas de pulgada (38 micrómetros). Se usarán preferentemente acabados de hule clorado.

PARTE EXPERIMENTAL

V. FORMULACION DEL RECUBRIMIENTO.

V.I. NORMAS.

Como se mencionó anteriormente, la formulación de este recubrimiento estará basada en especificaciones de PEMEX según:

PETROLEOS MEXICANOS

NORMAS DE CALIDAD DE MATERIALES Y EQUIPO USADOS EN OBRAS PUBLICAS

RECUBRIMIENTOS PARA PROTECCION ANTICORROSIVA REQUISITOS DE CALIDAD

NORMA 4.132.01

En este caso, la norma que se aplicaría al recubrimiento en estudio sería la siguiente:

C.03 Especificación: PEMEX-RP-4 TIPO B.

CARACTERISTICAS Y PRUBAS FISICAS:

	Min.	Max.
1. Tiempo de secado		
Al tacto (minutos)	-	20
Duro (horas)	-	2
2. Estabilidad		
Almacenamiento (días)	270	-
3. Flexibilidad y Adherencia		
Lámina pintada a 25 C.	pasa	-
4. Adherencia a 25 C (kg)	6	-
5. Gabinete Salino (horas)	750	-
6. Densidad (g/cm ³)	2.5	2.8
7. Viscosidad Copa Ford No.4 (seg)	35	50
8. Color	-	-
9. Finura	1.0	3
10. Retenido en malla U.S. 325 (%)	-	2
11. Aplicación por aspersion	pasa	-

12. Apariencia	2	pasa	-
13. Poder cubriente m / l		20	-
14. Curado		pasa	-

COMPOSICION (PARTES POR SEPARADO)	% en peso	
	Min.	Max.
15. Cantidad de pigmento.	68	70
Polvo de zinc (96% de pureza como zinc)	97	-
Otros	-	3
16. Vehiculo (silicato orgánico)	30	32
Silicato orgánico parcialmente hidrolizado, sobre vehiculo.	35	-
Materia volátil, sobre vehiculo.	-	65
Brea o derivados	-	0
17. Agua libre	-	-
18. Compatibilidad	pasa	-

PRUEBAS QUIMICAS (Inmersión continua)	Temperatura (C)	Tiempo (días)
--	--------------------	------------------

REACTIVO:

Agua dulce	20	30
Agua de mar	26	30
Metil Isobutil Cetona	20	30
Tolueno	20	30
Acetato de Etilo	20	30
Gasolina dulce	20	30
Metanol	20	30

Las pruebas químicas se efectuarán después de 48 hrs. de curado el recubrimiento. Al término de las pruebas y después de 2 horas de recuperación, el recubrimiento no deberá mostrar ablandamiento, ampollamiento, agrietamiento o pérdida de adhesión.

*RESULTADOS:

	Min.	Max.	RESULTADOS
1. Tiempo de secado			
Al tacto (minutos)	-	20	pasa
Duro (horas)	-	2	pasa
2. Estabilidad			
Almacenamiento (días)	270	-	pasa
3. Flexibilidad y Adherencia			
Lámina pintada a 25 C.	pasa	-	pasa
4. Adherencia a 25 C (kg)	6		10
5. Gabinete Salino (horas)	750	-	pasa
6. Densidad (g/cm ³)	2.5	2.8	2.312
7. Viscosidad Copa Ford No.4 (seg)	35	50	44
8. Color	-	-	gris
9. Finura (unidades Hegman)	1.0	3	1.0
10. Retenido en malla U.S. 325 (%)	-	2	-
11. Aplicación por aspersión	pasa	-	pasa
12. Apariencia	pasa	-	pasa
13. Poder cubriente m /l	20	-	27
14. Curado	pasa	-	pasa

COMPOSICION (PARTES POR SEPARADO)

	% en peso		RESULTADOS
	Min.	Max.	
15. Cantidad de pigmento.*			
Polvo de zinc (96% de pureza como zinc)	68	70	68.5
Otros	97	-	97.53
16. Vehículo (silicato orgánico)			
Silicato orgánico parcialmente hidrolizado, sobre vehículo.	-	3	2.47
Materia volátil, sobre vehículo.	30	32	31.5
Erea o derivados.	35	-	34.97
17. Agua libre	-	65	65.03
18. Compatibilidad	-	0	
	pasa	-	

***RESULTADOS (continuación)**

MEDIOS DE EXPOSICION

REACTIVO	Temperatura (C)	Tiempo (días)	RESULTADOS
Agua dulce	20	30	sin alterar
Agua de mar	26	30	sin alterar
Metil Isobutil Cetona	20	30	sin alterar
Tolueno	20	30	sin alterar
Acetato de Etilo	20	30	sin alterar
Gasolina dulce	20	30	sin alterar
Metanol	20	30	sin alterar

***ESTOS RESULTADOS FUERON OBTENIDOS EN EL INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO (IMP) EN LA SUBDIRECCION DE TECNOLOGIA DE LA EXPLOTACION, DIVISION DE CORROSION SEGUN EL PROYECTO No. D-8775, OFICIO No. O.C.T. 055, INFORME No. 195, CON FECHA 20 DE FEBRERO DE 1986.**

V.2 PARTES DEL RECUBRIMIENTO. CARACTERISTICAS PRINCIPALES.

Los componentes que forman este recubrimiento son los siguientes:

VEHICULO
 Silicato de Etilo
 Alcohol Etilico
 Metil-etil-cetona
 Acido clorhidrico
 Agua

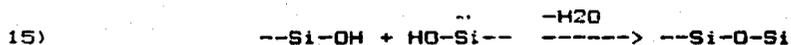
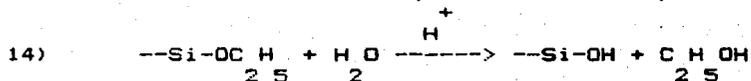
PIGMENTO
 Polvo de Zinc
 Mica micronizada

Silicato de Etilo: Es el formador de película; normalmente este compuesto debe hidrolizarse, ya que de lo contrario la velocidad de curado del recubrimiento sería demasiado lenta. Las características del producto comercial son las siguientes:

Descripción:	ésteres de diversos ácidos polisilícicos.
Forma de suministros:	líquido transparente.
Contenido de SiO₂:	40 - 42%
Densidad:	1.06
Viscosidad:	40 mm ² /s
Índice de refracción:	1.396 - 1.398
Contenido de ácido:	20 ppm máximo.
Contenido de Etanol:	2% máximo.
Tiempo de almacenaje:	12 meses.
Punto de solidificación:	menor a -40C.
Punto de ignición:	mayor a 40C.

V.3 MECANISMO DE FORMACION DE PELICULA.

Cuando se agrega agua, parte de los grupos etoxi se hidrolizan y se forman grupos Si-OH (reacción # 14), algunos de los cuales se condensan para formar uniones Si-O-Si (reacción # 15), mientras que los grupos restantes sirven como grupos reactivos para la reacción de curado una vez que se añadió el polvo de zinc.



La variable más importante en esta serie de reacciones es la cantidad de agua. Para convertir todos los grupos etoxi en uniones Si-O-Si, teóricamente se necesita 14.4% de agua (según datos del proveedor; basados en el contenido de sólidos del producto comercial). Cantidades mayores de agua provocarán un curado más rápido, aunque se acortará el tiempo de almacenamiento del producto, además de causar fallas en la adherencia del recubrimiento. Por el contrario, formulaciones con menos del 10% de agua no lograrán curar adecuadamente con el polvo de zinc. Por esta razón se recomienda normalmente del 10 al 13% de agua en relación al peso del producto comercial (40% en sólidos) empleado.

VI. PRUEBAS COMPARATIVAS.

VI.1. Pruebas de laboratorio y campo para calificar la eficiencia protectora de cada recubrimiento.

Como se mencionó anteriormente, no existe un recubrimiento universal; dicho de otra manera, existe cuando menos un recubrimiento para cada caso práctico en particular.

Una evaluación general de un conjunto de recubrimientos podría llevar a conclusiones falsas si no se tiene presente que cada producto está formulado para medios de exposición determinados.

Para propósitos de protección contra la corrosión, las pruebas más representativas son las de niebla salina e inmersión en agua destilada y agua de mar basadas en las normas de PEMEX según:

PETROLEOS MEXICANOS NORMAS DE CONTROL DE CALIDAD, MUESTREO Y PRUEBA DE MATERIALES USADOS EN OBRAS PUBLICAS

RECUBRIMIENTOS PARA PROTECCION ANTICORROSIVA MUESTREO Y PRUEBAS NORMA 5.132.01

Las pruebas de inmersión en diversos agentes químicos (solventes, derivados del petróleo, soluciones ácidas y alcalinas, etc.) serán representativas si se desea la protección de un sustrato en un medio ambiente determinado.

En la tabla # 19 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de niebla salina e inmersión en agua destilada y agua de mar (incisos E.06 y E.16 para niebla salina e inmersión en agua respectivamente).

TABLA # 19. RESULTADOS DE PRUEBAS DE INMERSION Y EXPOSICION EN CAMARA DE NIEBLA SALINA.

RECUBRIMIENTO	ESFESOR SECO (Mm)	TIEMPO Y TEMPERATURA DE EXPOSICION. OBSERVACIONES.		
AGUA DESTILADA-AGUA DE MAR-CAMARA SALINA				
RP-3-80	75	30 dias-25 C Sin alterar	30 dias-25 C Sin alterar	750 hrs. Pasa
RP-4-B-80	75	30 dias-25 C Sin alterar	30 dias-25 C Sin alterar	750 hrs. Pasa
RP-5-B-80	450	30 dias-60 C Sin alterar	30 dias-40 C Sin alterar	750 hrs. Corrosion en la ranu- ra. Pasa.

TABLA # 20. VALORES TÍPICOS DE CORROSIÓN.

MEDIO AMBIENTE	CLASIFICACION	INDICES APROX. DE CORROSIÓN (Mm/año)	ESPESOR MÍNIMO DE PELÍCULA SECA (Mm)
Rural	Levemente corrosivo	25	120
Urbano	Moderadamente corrosivo	30-40	150
Industrial y de litoral	Corrosivo	100	250
Industrial y marino intenso.	Altamente corrosivo	120	300

Normalmente se piensa que mientras mayor sea el espesor de película del recubrimiento protector, mejor será su grado de protección contra la corrosión. Para recubrimientos de un mismo tipo (epóxicos, por ejemplo) esto es cierto, pero para recubrimientos en general esta regla puede variar. En base a los resultados de la tabla # 19 se puede notar que un recubrimiento inorgánico de zinc (RP-3 ó RP-4) cuyo espesor de película seca es de 75 micrómetros, resiste 750 horas de cámara salina, mientras que un sistema vinílico de altos sólidos cuyo espesor total es de 200 micrómetros, soporta 500 horas de exposición en dicha cámara. Cuando se desea una protección máxima contra la corrosión, en la práctica se observa una tendencia hacia la elección de primarios inorgánicos de zinc, siendo el de tipo autocurante base solvente (RP-4-B-80) el que tiene una mayor demanda. Para casos en los que la limpieza con abrasivo a metal blanco sea imposible o impráctica normalmente se aplican:

1. Sistemas epóxicos (recubrimientos epoxy-poliamida, epoxy-amina, epoxy-alquitrán de hulla)
2. Sistemas de hule clorado.

En estos casos los sistemas vinílicos tienen poca demanda, ya que para la utilización de este tipo de recubrimientos hace falta una preparación exhaustiva de la superficie (limpieza con abrasivo a metal blanco).

VII. FABRICACION Y CONTROL DE CALIDAD

Como se mencionó anteriormente, este recubrimiento es de dos componentes envasados por separado:

1. Vehículo (parte líquida).
2. Polvo

La fabricación de este recubrimiento es relativamente simple. Para la elaboración del vehículo puede utilizarse un recipiente de plástico o acero inoxidable y un agitador con brazo de acero inoxidable (muchas veces con una pala de madera es suficiente).

La secuencia de fabricación es la siguiente:

1. Pesar la cantidad correspondiente de silicato de etilo (sin hidrolizar).
2. Agregar las partes correspondientes de alcohol etílico y metil-etil-cetona.
3. Pesar la cantidad correspondiente de agua, añadir el ácido clorhídrico e incorporar esta disolución ácida al vehículo en proceso.
4. Tapar perfectamente el recipiente (con un plástico para evitar la posible entrada de agua) y dejar que la hidrólisis se lleve a cabo (normalmente se requieren 24 hrs. a temperatura ambiente).
5. Envasar en garrapas de plástico (3 litros de vehículo en cada garrapa) y verificar que se encuentren perfectamente cerradas.

Para la elaboración del polvo únicamente se necesita una báscula para pesar con la mayor exactitud posible el polvo de zinc y la mica micronizada. Deberá incorporarse en esta parte una bolsita de sílica para evitar que el polvo absorba humedad.

El control de calidad de este producto también es muy simple, se requieren solamente tres pruebas para determinar si el recubrimiento cumple con los requerimientos básicos:

1. Tiempo de gelado.
2. Adherencia.
3. Rendimiento.

1. Tiempo de gelado: La reactividad del vehículo hidrolizado puede determinarse mediante esta prueba. En un tubo de ensayo se agregan 15 ml. del vehículo en cuestión, después se añaden 0.5 ml. de una disolución de NaOH 1 N y se agita esta disolución hasta que se forme un gel.

En la figura # 18 se graficó el tiempo de gelado vs. tiempo de almacenamiento. Puede observarse que existe una relación directamente proporcional entre el tiempo de gelado (reactividad) y el tiempo de almacenamiento.

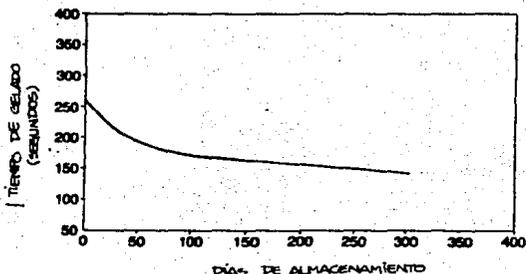


FIGURA # 18. TIEMPO DE GELADO.

2. Adherencia: Esta prueba se realiza con un peine de ranuras; este instrumento consta de seis cuchillas con una separación determinada (2mm) entre las cuchillas. Para efectuar pruebas de adherencia se realizan cortes transversales, de tal manera que se formen 25 cuadros. El peine de ranuras deberá colocarse siempre sobre películas totalmente secas (asegurándose de que los cortes lleguen al sustrato sin penetrar el mismo). Una vez hecha la cuadrícula, deberá cepillarse vigorosamente para eliminar el material removido durante el corte. Acto seguido, deberá fijarse una cinta adhesiva transparente sobre el enrejado y desprenderla de un sólo movimiento. Para que el lote de producción de este recubrimiento pueda ser distribuido, el porcentaje de desprendimiento (número de cuadros desprendidos) deberá ser nulo. El tiempo óptimo de curado para realizar esta prueba es de 168 hrs. (1 semana) una vez aplicado el recubrimiento a un espesor de 50-75 micrómetros; aunque con 48 hrs. de curado puede realizarse una prueba bastante confiable.

3. Rendimiento: Esta prueba se lleva a cabo para verificar los sólidos en volumen del recubrimiento. El rendimiento práctico promedio deberá ser de 4-5 m²/l a 75 micrómetros de espesor.

Existen muchas pruebas de control de calidad que pueden aplicarse a este recubrimiento (sólidos en peso, sólidos en volumen, cámara salina, inmersión en diversos medios), pero las antes citadas son las que pueden determinar con rapidez y confianza si el recubrimiento en cuestión está listo para ser distribuido y aplicado.

VIII. PREPARACION DE LA SUPERFICIE. METODO Y EQUIPO DE APLICACION.

VIII.1. PREPARACION QUE DEBE DARSE AL ACERO PARA QUE EL RECUBRIMIENTO ALCANCE SUS PROPIEDADES OPTIMAS.

Los métodos de preparación de superficie esencialmente pueden dividirse en dos categorías: 1) limpieza mecánica. 2) limpieza química.

Los métodos mecánicos de preparación de superficies son aquellos en los que se utiliza energía mecánica (abrasivos, agua o vapor de agua a alta presión) y las impurezas de la superficie se remueven físicamente.

Los métodos químicos involucran una acción química, normalmente disolución o emulsificación, para remover los contaminantes de la superficie.

Como se mencionó anteriormente, el tipo de preparación de superficie que debe darse al acero antes de aplicar el recubrimiento en estudio (RP-4-B) es la limpieza con abrasivo a metal blanco. Con este método se obtiene el máximo grado de limpieza mediante métodos mecánicos.

Normalmente se utilizan sistemas de presión directa que expulsan al abrasivo a una gran presión; el abrasivo almacenado en un tanque se alimenta directamente a una línea de alta presión (8-10 kg/cm²) para ser expulsado por una boquilla. Este sistema es el más utilizado para usos marinos e industriales, ya que con estos equipos la limpieza puede realizarse en tiempos relativamente cortos.

La apariencia de una superficie metálica tratada con este método es grisácea, de color metálico uniforme y ligeramente rugosa.

Este tratamiento consiste en una secuencia de operaciones según:

PETROLEOS MEXICANOS

NORMA PARA PROYECTO DE OBRAS

PREPARACION DE SUPERFICIES. APLICACION E INSPECCION DE RECUBRIMIENTOS PARA PROTECCION ANTICORROSIVA.

NORMA 3.132.01

Limpieza con abrasivos. PEMEX-LA-80.

1. GENERALIDADES. Se refiere a la limpieza de superficies metálicas aplicando un chorro de abrasivos a presión. Los abrasivos comúnmente usados son arena y granalla metálica.

2. PROCEDIMIENTO. Consta de las siguientes operaciones y de acuerdo con las condiciones de la superficie o especificaciones de cada obra, se podrá eliminar o modificar la ejecución de cualquiera de estas operaciones.

a) Se hará un descostrado como se especifica en el procedimiento de Limpieza Manual PEMEX-LM-80 (con ayuda de marro, martillo y cincel se quitarán las costras de óxido, escamas y restos de soldadura o escorias).

b) Los depósitos de óxido, pintura y cualquier otra substancia extraña serán totalmente removidos de la superficie por medio del chorro abrasivo.

c) El agente abrasivo será clasificado entre mallas Mex-18 y Mex-80 de acuerdo al patrón de anclaje requerido. Cuando se use arena, esta será cuarzosa o silicosa, lavada y seca; no deberá estar contaminada con sales.

Quando se use granalla metálica, esta será del tipo munición acerada limpia y seca y escoria de coke o escoria de cobre.

d) La rugosidad o máxima profundidad del perfil que se obtenga en la superficie limpia y que servirá como anclaje para el recubrimiento estará comprendida entre 1 y 2.5 milésimas de pulgada (25-63 micrómetros) de acuerdo con el espesor de película del primario, el cual deberá ser mayor que el perfil de anclaje.

En la tabla # 21 se listan los perfiles de anclaje que pueden obtenerse con distintos abrasivos.

TABLA # 21. PERFILES DE ANCLAJE.

TIPO DE ABRASIVO	TAMANO DE PARTICULA EN MALLA	PERFIL PROMEDIO	
		MILSESIMAS	MICRONES
Arena muy fina.	80	1.6	40
Arena fina.	40	2.0	50
Arena regular.	18	2.6	65
Arena gruesa.	12	2.8	70
Granalla de acero No. G-80.	40	1.2-3.0	30-75
Granalla de acero No. G-50.	25	3.4	85
Granalla de acero No. G-40.	18	3.6	90
Granalla de acero No. G-25.	16	4.0	100
Granalla de acero No. G-16.	12	8.0	200

TABLA # 21 (CONTINUACION)

TIPO DE ABRASIVO	TAMANO DE PARTICULA EN MALLA	PERFIL PROMEDIO MILSESIMAS	MICRONES
Perdigón de acero No. S-170.	20	1.6-2.6	45-70
Perdigón de fierro No. S-230.	18	3.0	75
Perdigón de fierro No. S-330.	16	3.4	85
Perdigón de fierro No. S-390.	14	3.6	90

e) El aire utilizado deberá estar exento de agua, aceite o grasa.

f) Una vez efectuada la limpieza cuando se emplee chorro de arena, se hará una eliminación del polvo como se detalla en el procedimiento de Limpieza Manual PEMEX-LM-80 (la superficie se deberá limpiar con brocha de cerda o cepillo para eliminar las partículas de polvo. Se podrá hacer este trabajo también soplateando la superficie con un chorro de aire seco y limpio. Tratándose de tableros e instrumentos eléctricos y neumáticos se usará una aspiradora.

g) La granalla metálica podrá usarse nuevamente en limpiezas posteriores, siempre y cuando esté libre de contaminantes, seca y tamizada de acuerdo a las mallas señaladas en el inciso "c".

Existen algunos organismos internacionales, los cuales cuentan con especificaciones propias para calificar el grado de limpieza con abrasivos; en la tabla # 22 se listan las equivalencias de estos organismos.

TABLA # 22. EQUIVALENCIAS DE PREPARACION DE SUPERFICIE.

TIPO	SSFC	NACE	SA	BS
*L.Ch.A. metal bco.	SSFC-SP5	NACE No.1	SA 3	BS 4232 1ST.QUALITY
*L.Ch.A. comercial.	SSFC-SP6	NACE No.3	SA 2	BS 4232 3RD.QUALITY
*L.Ch.A. ráfaga.	SSFC-SP7	NACE No.4	SA 1	LIGHT BLAST TO BRUSH OFF.

* Limpieza con chorro de abrasivo.

SSFC: STEEL STRUCTURES PAINTING COUNCIL.

NACE: NATIONAL ASSOCIATION OF CORROSION ENGINEERS.

SA: SWEDISH STANDARD.

BS: BRITISH STANDARD.

En cualquier caso en que se haya especificado preparación con abrasivo, el tiempo máximo que se permitirá que transcurra entre la limpieza y la protección de la superficie dependerá del ambiente en que se opere; nunca podrá ser mayor de 4 horas.

VIII.2. METODO Y EQUIPO DE APLICACION

Este producto se envasa en dos recipientes; uno contiene el vehículo (líquido reactivo) y el otro contiene el pigmento. Deberán mezclarse 7 kg de pigmento con 3 litros de vehículo (el material viene envasado en estas proporciones) para obtener 4 litros de mezcla. Estas proporciones de mezcla no deberán variarse.

Antes de hacer la mezcla debe evitarse que tanto los recipientes del polvo como del líquido se calienten con el sol u otra fuente de calor, ya que si se mezclan calientes los materiales pueden gelarse.

Después de mezclado, el material deberá conservarse en recipientes cerrados para evitar la evaporación de los solventes y la formación de natas. En recipientes cerrados este recubrimiento tiene una vida de uso de 12 horas a 25 C.

Este recubrimiento deberá aplicarse por aspersion; el equipo de aplicación deberá estar limpio y libre de humedad, por tal motivo es conveniente enjuagar el equipo de atomización con thinner antes de aplicar el recubrimiento. En la tabla # 23 se listan las características de los equipos de aplicación.

TABLA # 13. EQUIPOS DE APLICACION.

PISTOLA	BOQUILLA DE FLUIDO	CASQUILLO DE AIRE
Binks # 18 ó 19	66	66 PE
Devilbiss F-MBC ó JGA	E	704

El procedimiento de atomización es el siguiente:

1) Cuando se use equipo Devilbiss la presión en la línea de aire a la pistola deberá ser constante (3.5-4.2 kg/cm²). La presión en el recipiente deberá ser de 0.7 kg/cm² cuando se use una manguera para el material de 8 metros de largo y 1/2 pulgada (12.7 mm) de diámetro interno.

2) El recipiente que contiene la resina deberá conservarse a la misma altura de la pistola, y que se trata de un material muy pesado y no puede elevarse a más de dos metros de altura a través de la manguera.

3) Sustener la pistola a una distancia de 25-30 cm de la superficie; si se usa equipo Devilbiss, el abanico deberá ser de 25 cm aproximadamente.

4) Mantener la pistola en ángulo recto con respecto a la superficie y hacer aspersiones uniformes y paralelas.

5) Aplicar una sola mano húmeda y gruesa (9-10 milésimas de pulgada de espesor húmedo). Durante la aplicación vuélvase a cubrir (traslapar) 50% de cada mano anterior para evitar que queden áreas donde la película sea demasiado delgada.

El equipo de aplicación deberá estar provisto de un agitador, para evitar la sedimentación del polvo.

6) Deberá darse atención especial a todas las soldaduras, costuras, esquinas, remaches y rugosidades para asegurar un cubrimiento completo.

7) El equipo de atomización puede ser lavado con cualquier thinner estándar.

El espesor de película seca es determinante para que el recubrimiento brinde una protección eficiente y duradera; no deberá ser menor de 2 milésimas de pulgada (51 micrómetros) y no deberá ser mayor de 4 milésimas de pulgada (100 micrómetros) para evitar fallas de adherencia y agrietamientos.

IX. COMPATIBILIDAD CON ACABADOS DE DIVERSA INDOLE.

Sobre este recubrimiento pueden aplicarse los siguientes acabados:

- Epóxico catalizado (RA-21).
- Vinílico altos sólidos (RA-22).
- Vinil-acrílico (RA-25).
- Epóxico altos sólidos (RA-26).

Si se desea aplicar cualquiera de los acabados RA-22 y RA-25, estos deberán ser aplicados sobre un enlace vinil-epóxico modificado (RP-7-E) para evitar fallas de adherencia.

Antes de aplicar cualquiera de los acabados arriba mencionados, deberá dejarse curar el primario cuando menos 72 horas.

En la tabla # 24 se listan los sistemas recomendados para cada tipo de exposición.

TABLA # 24. SISTEMAS RECOMENDADOS PARA CADA TIPO DE EXPOSICION.

CONDICION DE EXPOSICION	PRIMARIO (ESPEJOR) (MICRONES)	ACABADO (ESPEJOR) (MICRONES)	ESPEJOR TOTAL
Ambiente húmedo.	RP-4-B 50-75	RA-21 75	125-150
		*RA-22 150	200-225
		*RA-25 75-100	150-200
		RA-26 250	300-325
Ambiente húmedo y salino.	RP-4-B 50-75	RA-21 75	125-150
		*RA-22 150	200-225
		*RA-25 75-100	150-200
		RA-26 250	300-325
Ambiente húmedo y salino con gases derivados de azufre.	RP-4-B 50-75	RA-21 75	125-150
		*RA-22 150	200-225
		*RA-25 75-100	150-200
		RA-26 250	300-325
Ambiente marino.	RP-4-B 50-75	RA-21 75	125-150
		*RA-22 150	200-225
		*RA-25 75-100	150-200
		RA-26 250	300-325
Cubierta de embarcaciones.	RP-4-B 50-75	*RA-22 100	175-200
Caseteria de embarcaciones.	RP-4-B 50-75	*RA-25 75-100	150-200

* El RA-22 y RA-25 se utilizan con previa aplicación del enlace vinil-epóxico modificado (RP-7-E aplicado a 25 micrómetros de espesor).

X. PROTECCION CONTRA LA CORROSION; IMPORTANCIA ECONOMICA.

En la actualidad no es ninguna novedad el grave problema que representa el costo derivado de la corrosión y la protección metálica para la economía de una empresa en particular y de un país en general. Ante la actual crisis económica y las dificultades de importación de diferentes metales y aleaciones, es una necesidad apremiante lograr una mayor duración y el óptimo aprovechamiento de los recursos disponibles.

Hasta la fecha, no se dispone de información confiable que permita realizar una evaluación, siquiera aproximada, de los costos directos que suponen para México los problemas relacionados con la corrosión metálica. Estimaciones basadas en datos fidedignos realizadas en otros países (Inglaterra, E.U.A. y España) podrían ayudar a señalar una cifra de varios miles de millones de pesos, cifra que podría ser mayor por los graves problemas de contaminación que sufren algunas zonas del país y las dimensiones de la planta industrial petrolera.

Un estudio reciente realizado por el National Bureau of Standards de los E.U.A. (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 Interno Bruto (P.I.B.). El estudio señala que aproximadamente un gasto del 15%, o sea 10.5 billones de dólares (0.6% del P.I.B.) pudo haberse evitado.

En un país con un grado de desarrollo tecnológico parecido al de México, Egipto, se realizó un estudio similar. Durante la investigación (3 años) se evaluaron los efectos económicos causados por la corrosión de los metales, los cuales se estimaron en aproximadamente 475 millones de dólares, cifra que representa el 4.9% del P.I.B. de Egipto.

Los estudios de que se dispone hasta la fecha, han sido realizados entre 1949 y 1979 y provienen básicamente de 9 países. Los resultados de estos estudios se listan en la tabla # 25 y están referidos en dólares del año en que se realizó cada estudio (en los casos en los que fue posible, se reportó el porcentaje del P.I.B.).

TABLA # 25. COSTO DE LA CORROSION POR AÑO.

ANO	PAIS	COSTO DE LA CORROSION POR AÑO	% DEL P.I.B.
1949	U.S.A.	5,500	
1960-61	India	320	
1964	Suecia	58 a 77	
1965	Finlandia	47 a 62	0.58 a 0.77
1968-69	R.F.A.	6,000	3.0
1969	U.R.S.S.	6,700	2.0
1969	Gran Bretaña	3,200	3.5
1973	Australia	350	1.5 a 3.0
1974	U.R.S.S.	18,850	4.1
1975	U.S.A.	70,000	4.2
1976-77	Japón	9,200	1.8

En general, los costos debidos a la corrosión oscilan entre el 1 y el 4% del P.I.B.. La manera como se distribuyen estos costos es difícil de precisar y varía de un país a otro, ya que dependen de diversas variables (situación geográfica, desarrollo tecnológico, etc.). Un gran número de los estudios realizados revelan que aproximadamente entre un 20 y un 25% del costo total de la corrosión pudo haberse evitado mediante la utilización de la actual tecnología sobre selección de materiales y diseño apropiado, y de las técnicas anticorrosivas de protección más idóneas para cada caso en particular.

Si se analiza un caso clásico de corrosión, como lo es la protección de cualquier equipo, vehículo o superficie en la costa (en este caso unos tanques pintados en el año de 1960), y se comparan los costos de adquisición, aplicación y mantenimiento de dos sistemas de protección, puede notarse lo siguiente:

CASO I:

La superficie metálica se limpió con abrasivo a metal blanco y se aplicó un recubrimiento inorgánico de zinc autocurante base solvente (RF-4-B), posteriormente se aplicaron tres capas de un acabado vinílico de altos sólidos (RA-22).

En 1965, aunque el medio ambiente era muy corrosivo, los tanques no mostraban corrosión alguna. Como medida preventiva contra la corrosión se aplicaron dos capas de acabado vinílico de altos sólidos (RA-22).

En 1968 por razones estéticas (el recubrimiento vinílico había perdido brillo), se aplicó una capa de acabado vinílico, y otra más en 1973. En cada caso en que se volvió a aplicar una o varias capas de acabado no hubo necesidad de preparar concienzudamente la superficie, ya que los tanques no mostraban el menor indicio de corrosión. En el año de 1976 el estado del sistema protector era bastante bueno y no se requirió ningún tipo de trabajo de mantenimiento preventivo o correctivo.

CASO II:

En 1960, otros tanques en la misma zona también fueron limpiados con abrasivo a metal blanco y fueron protegidos con un sistema de 3 capas de hule clorado (1 capa de primario RF-9 y 2 de acabado RA-27), el cual en 13 años de servicio hubo necesidad de repintarlo en cinco ocasiones: la primera en 1963, la segunda en 1966, la tercera en 1970, la cuarta en 1973 y la quinta en 1976. En todos los casos en los que se repintó la superficie, hubo necesidad de preparar cuidadosamente la superficie, ya que se observaron graves daños causados por la corrosión.

Aunque el costo inicial del sistema inorgánico de zinc-vinilo altos sólidos es mayor al del sistema de hule clorado, el costo anual equivalente fue menor para el primer sistema. El estudio a continuación lo demuestra:

CASO I:

1960

- Aplicación de 1 capa de primario inorgánico de zinc autocurante base solvente (RP-4-B).
- Aplicación de 3 capas de acabado vinílico de altos sólidos (RA-22).

	ESPESOR POR CAPA mm	ESPESOR TOTAL mm
1 Capa RP-4-B	75	75
3 Capas RA-22	75	225
		300

RENDIMIENTOS:	MATERIAL m ² /l	MANDO DE OBRA
		2
RP-4-B	5	15 m por jornada
RA-22	3	(1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario mínimo por día:	14.50 pesos.
Salario ayudante:	14.50 pesos.
Salario oficial:	21.75 pesos.

PRECIOS DE CADA RECUBRIMIENTO:

Precio por litro RP-4-B:	\$39.80
Precio por litro RA-22:	\$20.10

ANALISIS POR m²:

RP-4-B	\$ 7.96
RA-22	\$ 20.10
Oficial	\$ 1.46
Ayudante	\$ 0.97
	\$ 30.49
TOTAL	\$ 30.49

1965

- Aplicación de 2 capas de acabado vinilico de altos sólidos (RA-22).

	ESPEJOR POR CAPA mm	ESPEJOR TOTAL mm
2 Capas RA-22	75	150

RENDIMIENTOS:	MATERIAL m ² /l	MANO DE OBRA
		2
RA-22	3	10 m por jornada (1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario mínimo por día:	21.50 pesos.
Salario ayudante:	21.50 pesos.
Salario oficial:	32.25 pesos.

Precio por litro RA-22: \$22.80

ANALISIS POR m²:

RA-22	\$ 15.20
Oficial	\$ 3.23
Ayudante	\$ 2.15
TOTAL	\$ 20.58

1968

- Aplicación de 1 capa de acabado vinilico de altos sólidos (RA-22).

	ESPEJOR POR CAPA mm	ESPEJOR TOTAL mm
1 Capa RA-22	75	75

RENDIMIENTOS:**MATERIAL**
m²/l**MANO DE OBRA**

RA-22

3

2
15 m por jornada
(1 oficial + 1 ayudante)**SALARIOS:**

Salario mínimo por día:	28.25 pesos.
Salario ayudante:	28.25 pesos.
Salario oficial:	42.38 pesos.

Precio por litro RA-22: \$23.80

ANALISIS POR m²:

RA-22	\$ 7.93
Oficial	\$ 2.85
Ayudante	\$ 1.90
	<hr/>
	\$ 12.68

1973

- Aplicación de 1 capa de acabado vinilico de altos sólidos (RA-22).

	ESPESOR POR CAPA	ESPESOR TOTAL
	m	m
1 Capa RA-22	75	75

RENDIMIENTOS:**MATERIAL**
m²/l**MANO DE OBRA**

RA-22

3

2
15 m por jornada
(1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario minimo por día:	44.85 pesos.
Salario ayudante:	44.85 pesos.
Salario oficial:	67.28 pesos.

Precio por litro RA-22: \$35.30

ANALISIS POR m²:

RA-22	\$11.77
Oficial	\$ 4.49
Ayudante	\$ 2.99
<hr/>	
TOTAL	\$19.25

COSTO POR m²

Costo inicial, 1960:	\$ 30.49
Dos capas de acabado, 1965:	\$ 20.58
Una capa de acabado, 1968:	\$ 12.68
Una capa de acabado, 1973:	\$ 19.25

CASO II:

1960

- Aplicación de 1 capa de primario de hule clorado (RP-9).
- Aplicación de 2 capas de acabado de hule clorado (RA-27).

	ESPESOR POR CAPA Mm	ESPESOR TOTAL Mm
1 Capa RP-9	75	75
2 Capas RA-27	75	150
		<hr style="width: 50px; margin-left: auto; margin-right: 0;"/>
		225

RENDIMIENTOS:	MATERIAL m ² /l	MANO DE OBRA
		2
RP-9	4	15 m por jornada
RA-27	2.5	(1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario mínimo por día:	14.50 pesos.
Salario ayudante:	14.50 pesos.
Salario oficial:	21.75 pesos.

PRECIOS DE CADA RECUBRIMIENTO:

Precio por litro RP-9 :	\$22.60
Precio por litro RA-27:	\$24.20

ANALISIS POR m²:

RP-9	\$ 5.65
RA-27	\$ 19.36
Oficial	\$ 1.46
Ayudante	\$ 0.97
	<hr style="width: 50px; margin-left: 0; margin-right: auto;"/>
TOTAL	\$ 27.44

1963

- Aplicación de 2 capas de acabado de hule clorado (RA-27).

	ESPESOR POR CAPA mm	ESPESOR TOTAL mm
2 Capas RA-27	75	150

RENDIMIENTOS:	MATERIAL m ² /l.	MANO DE OBRA
RA-27	2.5	2 7.5 m por jornada (1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario minimo por dia:	17.50 pesos.
Salario ayudante:	17.50 pesos.
Salario oficial:	26.25 pesos.

Precio por litro RA-27: \$ 26.05

ANALISIS POR m²:

RA-27	\$ 20.84
Oficial	\$ 3.50
Ayudante	\$ 2.33

TOTAL	\$ 26.67

1966

- Aplicación de 2 capas de acabado de hule clorado (RA-27).

	ESPESOR POR CAPA mm	ESPESOR TOTAL mm
2 Capas RA-27	75	150

RENDIMIENTOS:	MATERIAL	MANO DE OBRA
	m2/l	
RA-27	2.5	2 7.5 m por jornada (1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario minimo por dia:	25 pesos.
Salario ayudante:	25 pesos.
Salario oficial:	37.50 pesos.

Precio por litro RA-27: \$ 28.00

ANALISIS POR m2:

RA-27	\$ 22.40
Oficial	\$ 5.00
Ayudante	\$ 3.33

TOTAL	\$ 30.73

1970

- Aplicación de 2 capas de acabado de hule clorado (RA-27).

	ESPESOR POR CAPA	ESPESOR TOTAL
	µm	µm
2 Capas RA-27	75	150

RENDIMIENTOS:	MATERIAL	MANO DE OBRA
	m2/l	
RA-27	2.5	2 7.5 m por jornada (1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario minimo por dia:	32 pesos.
Salario ayudante:	32 pesos.
Salario oficial:	48.00 pesos.

Precio por litro RA-27: \$ 29.05

ANALISIS POR m2:

RA-27	\$ 23.24
Oficial	\$ 6.40
Ayudante	\$ 4.27

TOTAL	\$ 33.91

1973

- Aplicación de 2 capas de acabado de hule clorado (RA-27).

	ESPESOR POR CAPA mm	ESPESOR TOTAL mm
2 Capas RA-27	75	150

RENDIMIENTOS:	MATERIAL m2/l	MANO DE OBRA
RA-27	2.5	2 7.5 m por jornada (1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario minimo por dia:	44.85 pesos.
Salario ayudante:	44.85 pesos.
Salario oficial:	67.28 pesos.

Precio por litro RA-27: \$ 50.90

ANALISIS POR m2:

RA-27	\$ 40.72
Oficial	\$ 8.97
Ayudante	\$ 5.98

TOTAL	\$ 55.67

1976

- Aplicación de 2 capas de acabado de hule clorado (RA-27).

	ESPESOR POR CAPA µm	ESPESOR TOTAL µm
2 Capas RA-27	75	150

RENDIMIENTOS:	MATERIAL m ² /l	MANO DE OBRA
RA-27	2.5	2 7.5 m por jornada (1 oficial + 1 ayudante)

SALARIOS:

Salario minimo por dia:	69.30 pesos.
Salario ayudante:	69.30 pesos.
Salario oficial:	103.95 pesos.

Precio por litro RA-27: \$ 87.50

ANALISIS POR m²:

RA-27	\$ 70.00
Oficial	\$ 13.86
Ayudante	\$ 9.24
TOTAL	\$ 93.10

COSTO POR m²

Costo inicial, 1960:	\$ 27.44
Repintado, 1963:	\$ 26.67
Repintado, 1966:	\$ 30.73
Repintado, 1970:	\$ 39.91
Repintado, 1973:	\$ 55.67
Repintado, 1976:	\$ 93.10

El planteamiento del presente estudio es el siguiente:

- Todos los costos (adquisición, aplicación, salarios) se reducirán a un año base, en este caso 1960.
- El indicador económico que determinará la opción más conveniente será el costo anual equivalente (equal annual cost). Dicho indicador se determina de la siguiente manera:

$$C.A.E. = \text{VALOR PRESENTE} * \text{VALOR DE OPORTUNIDAD}$$

$$C.A.E. = \text{COSTO ANUAL EQUIVALENTE}$$

$$\text{VALOR PRESENTE} = P_{1960} = \frac{P}{(1+i)^n}$$

Donde :

N: Año en cuestión

n: Número de años.

i: Índice inflacionario anual.

$$\text{VALOR DE OPORTUNIDAD} = V D O = \frac{i (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

i = Índice inflacionario anual promedio (1960-1976)

n = Número de años

- Para las ecuaciones del valor presente y costo de oportunidad, se utilizaron índices de inflación en lugar de tasas de interés.

Para obtener una base de costos común, todos los costos se reducirán a valor presente del año 1960 según:

$$P_{1960} = P / (1+i)^N$$

Donde :

N: Año en cuestión

n: Número de años.

i: Índice inflacionario anual.

Para la determinación de los índices inflacionarios se tomaron los índices de precios reportados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). En la tabla # 26 se listan dichos índices.

TABLA # 26. INDICES INFLACIONARIOS DE 1960 A 1976.

	%
1961	1.3
1962	1.7
1963	4.7
1964	4.5
1965	1.9
1966	1.15
1967	2.7
1968	2.2
1969	2.5
1970	6
1971	3.7
1972	2.6
1973	16
1974	22.4
1975	10.4
1976	22.4

Como se mencionó anteriormente, todos los costos se reducirán a valor presente del año 1960 para tener una base común. Para el caso I se tiene:

1960 (costo inicial)	\$ 30.49
1965 (dos capas de RA-22)	\$ 17.92
1968 (una capa de acabado)	\$ 10.36
1973 (una capa de acabado)	\$ 11.77
TOTAL (valor presente 1960)	\$ 70.54

Para obtener el costo anual equivalente (equal annual cost) de 1960 a 1976:

CASO I

costo anual equivalente = valor presente * V D O

valor presente = \$ 70.54

V D O = Valor de oportunidad (capital recovery factor)

$$V D O = \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

i = índice inflacionario anual promedio (1960-1976)

n = número de años

$$\text{costo anual equivalente} = \$ 70.54 * \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

i = 6.63 %

n = 16

$$V D O = \frac{0.0663 (1.0663)^{16}}{(1.0663)^{16} - 1} = 0.10328$$

costo anual equivalente = \$ 70.54 * 0.10328

costo anual equivalente = \$ 7.285 pesos/a² para 16 años

Y para el caso II:

1960 (costo inicial)	\$ 27.44
1963 (repintado)	\$ 24.63
1966 (repintado)	\$ 26.95
1970 (repintado)	\$ 30.12
1973 (repintado)	\$ 34.04
1976 (repintado)	\$ 34.36

TOTAL (valor presente 1960) \$ 177.54

costo anual equivalente = valor presente * V D O

valor presente = \$ 177.54

V D O = Valor de oportunidad (capital recovery factor)

$$V D O = \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

i = índice inflacionario anual promedio (1960-1976)
n = número de años

$$\text{costo anual equivalente} = \$ 177.54 * \frac{i (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1}$$

i = 6.63 %

n = 16

$$F R C = \frac{0.0663 (1.0663)^{16}}{(1.0663)^{16} - 1} = 0.10328$$

costo anual equivalente = \$ 177.54 * 0.10328

costo anual equivalente = \$ 18.336 pesos/m²

	CASO I	CASO II
costo anual equivalente (pesos por año por 16 años)	7.285	18.336

Con esta somera comparación, queda de manifiesto que resulta mucho más económico (2.5 veces en este caso) la aplicación de sistemas protectores de alta calidad

Con el uso de primarios inorgánicos de zinc se reducirán los costos de mantenimiento como porcentaje del capital invertido para equipos e instalaciones con una vida útil larga (10 años o más). Para equipos cuyo uso sea temporal (menos de 5 años), no se recomienda una inversión tan alta para su protección.

XI. CONCLUSIONES

Hoy en día, en nuestro país existe una tendencia natural hacia la adquisición de productos de bajo costo y por tanto, en la mayoría de los casos, de menor calidad.

Para propósitos de protección contra la corrosión queda de manifiesto que resulta mucho más conveniente desde el punto de vista práctico, técnico y económico la utilización de sistemas con un excelente grado de protección, y por tanto de alta calidad. La demanda de recubrimientos de alta calidad, y en particular de este primario (RP-4-B) deberá aumentar a medida que aumente el costo de la vida, ya que cada vez resultarán mucho más costosas las labores de mantenimiento preventivo y correctivo.

La protección contra la corrosión mediante recubrimientos es el método más usado normalmente y la utilización de recubrimientos de alta calidad podrá alargar la vida útil de un gran número de equipos, vehículos, estructuras, etc, evitándose graves pérdidas económicas debidas a la corrosión.

Dadas las dimensiones de nuestra planta productora de petróleo, y el gran impulso industrial que está cobrando nuestro país, cada día se vuelve más apremiante la necesidad de proteger y mantener en buen estado cualquier instalación que contribuya al desarrollo económico, tecnológico y social de México.

BIBLIOGRAFIA

- Weismantel, Guy E.
PAINT HANDBOOK
Mc.Graw-Hill
Nueva York, E.U.A., 1981.
- Toedt, Fritz
CORROSION Y PROTECCION
Ed. Aguilar
Madrid, España, 1959.
- Parker, Dean H.
PRINCIPLES OF SURFACE COATING TECHNOLOGY
John Wiley & Sons
E.U.A., 1965.
- Fleming Payne, Henry
ORGANIC COATING TECHNOLOGY
John Wiley & Sons
E.U.A., 1961.
- Leidheiser, Henry
CORROSION CONTROL BY COATINGS
Science Press
E.U.A., 1978.
- Steel Structures Painting Council
STEEL STRUCTURES PAINTING MANUAL (VOLS. I Y II)
2a. Edición
Pittsburgh, E.U.A., 1973.
- The George Brown College of Applied Arts Technology.
PAINT TECHNOLOGY COURSE
Ontario, Canadá, 1981.
- Fontana & Greene
CORROSION CONTROL ENGINEERING
Mc Graw-Hill
E.U.A., 1967.
- Evans, Ulick R.
AN INTRODUCTION TO METALIC CORROSION
Ed. Edward Arnold
Inglaterra, 1981.
- West, J.M.
ELECTRODEPOSITION AND CORROSION PROCESSES
Van Nostrand Co.
E.U.A., 1965.

BIBLIOGRAFIA (cont.)

- Scully, J.C.
THE FUNDAMENTALS OF CORROSION
2a. Edición
Pergamon Press
Inglaterra, 1975.
- Laque, Francis L.
MARINE CORROSION. CAUSES AND PREVENTION
John Wiley & Sons
E.U.A., 1975.
- Evans, Ulick R.
THE CORROSION AND OXIDATION OF METALS
Ed. Edward Arnold
Inglaterra, 1975.
- Burns & Bradley
PROTECTIVE COATINGS FOR METALS
Reinhold Publishing Corp.
E.U.A., 1955.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
ESTADÍSTICAS HISTÓRICAS DE MÉXICO (TOMOS I Y II).
Dirección General de Estadística
México D.F., 1985.
- Petróleos Mexicanos
Normas para Proyecto de Obras
Sistemas de Protección Anticorrosiva
Norma 2.132.01
México D.F., 1986.
- Petróleos Mexicanos
Normas para Proyecto de Obras
Preparación de Superficies, Aplicación e Inspección de
Recubrimientos para Protección Anticorrosiva.
Norma 3.132.01
México D.F., 1982.
- Petróleos Mexicanos
Normas de Calidad de Materiales y Equipo usados en Obras
Públicas
Recubrimientos para Protección Anticorrosiva. Requisitos de
Calidad
Norma 4.132.01
México D.F., 1985.
- Corrosión y Protección en la Industria Química Mexicana.
Ciencia y Desarrollo (Vol. 64, pp 103-111)
México, 1985.

- T.R.P. Watson
Economic Evaluation of Corrosion Control
Materials Performance (23(1) pp 29-33)
E.U.A., 1984.
- Margolis, Emil J.
Chemical Principles in Calculations of Ionic Equilibria
The Mac Millan Company
Nueva York, E.U.A., 1966
- Bard Allen J.
Chemical Equilibrium
Harper & Row Publishers
Nueva York, E.U.A., 1966