



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

CONOCIMIENTO Y PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN

Julio Cesar Vallejo Figueroa

Asesorado por el Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma

Guatemala, septiembre de 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

CONOCIMIENTO Y PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JULIO CESAR VALLEJO FIGUEROA

ASESORADO POR: ING. CARLOS ANIBAL CHICOJAY COLOMA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2006

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

| | |
|------------|------------------------------------|
| DECANO | Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos |
| VOCAL I | Inga. Glenda Patricia García Soria |
| VOCAL II | Lic. Amahan Sánchez Alvarez |
| VOCAL III | Ing. Julio David Galicia Celada |
| VOCAL IV | Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz |
| VOCAL V | Br. Elisa Yasminda Vides Leiva |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas |

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

| | |
|------------|-------------------------------------|
| DECANO | Ing. Roberto Mayorga Rouge |
| EXAMINADOR | Ing. Ivo Lavarreda Pantoja |
| EXAMINADOR | Ing. David Enrique Aldana Fernández |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma |
| SECRETARIO | Ing. René Andrino Guzmán |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CONOCIMIENTO Y PREVENCIÓN DE LA CORROSIÓN,

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica con fecha 21 de noviembre de 2005.

Julio Cesar Vallejo Figueroa

AGRADECIMIENTOS A:

DIOS

que con su infinita bondad y amor me ha iluminado para superar cada uno de los obstáculos, tanto de mi vida profesional, como familiar.

Mi Madre

mi verdadero orgullo, mi mejor ejemplo y mi razón de ser, que este sea un pequeño homenaje a su grandeza.

Mi hermano y a su esposa

Oscar Roberto Vallejo e Hilda Judith Argueta de Vallejo, por que fueron ellos los que con su amor y visión forjaron la idea de apoyarme en todo sentido para la obtención de esta carrera.

Mi esposa

Ana Beatriz Celada de Vallejo, por su constante apoyo para el logro de todos nuestros sueños.

DEDICATORIA A:

- Mis padres:** Cesar Vallejo y Graciela Figueroa Quan por el amor incondicional que me brindaron en mi formación.
- Mi esposa:** Por su comprensión y dedicación en la formación de nuestra familia.
- Mis hijos:** Ana Leslie, Julio Roberto y Edgar Daniel; más que un ejemplo quiero que este sea un peldaño a superar en la vida de cada uno de ellos.
- Mis hermanos:** Manuel, Miguel Ángel, Oscar Roberto, Jorge René, Gladis y Norma, con mucho cariño
- Mi familia:** En especial a mis tíos: Zoilita Castañeda de Aragón, Florita Figueroa de Arana y Luis Enrique Castañeda Quan

ÍNDICE GENERAL

| | |
|--------------------------------|-------|
| ÍNDICE DE ILUSTRACIONES | V |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| GLOSARIO | XI |
| RESUMEN | XIX |
| OBJETIVOS | XXI |
| INTRODUCCIÓN | XXIII |

1 PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA LA COMPRENSIÓN DE LA CORROSIÓN

| | | |
|-------|--|----|
| 1.1 | Reacciones anódicas y catódicas | 2 |
| 1.1.1 | Reacciones anódicas | 2 |
| 1.1.2 | Reacciones catódicas | 3 |
| 1.2.3 | Proceso combinado ánodo - cátodo | 4 |
| 1.2 | Potencial de electrodo | 5 |
| 1.3 | Diagrama de pourbaix (E en función del PH) | 7 |
| 1.4 | Tasas de corrosión | 12 |
| 1.5 | Unidades de corrosión | 13 |

2 AMBIENTES CORROSIVOS

| | | |
|-------|------------------------------|----|
| 2.1 | Atmósfera | 17 |
| 2.1.1 | Atmósfera industriales | 17 |
| 2.1.2 | atmósferas marinas y rurales | 18 |
| 2.2 | Sustancias químicas | 22 |

3 TIPOS Y FORMAS DE CORROSIÓN

| | | |
|-------|---|----|
| 3.1 | Corrosión electroquímica | 23 |
| 3.1.1 | Corrosión galvánica | 26 |
| 3.1.2 | Corrosión atmosférica | 28 |
| 3.1.3 | Corrosión por corrientes vagabundas | 29 |
| 3.2 | Corrosión por lixiviación selectiva | 30 |
| 3.3 | Corrosión al nivel del agua por concentración del oxígeno | 31 |
| 3.4 | Oxidación | 32 |
| 3.4.1 | Películas de óxido | 33 |
| 3.4.2 | Formación de la cascarilla | 33 |
| 3.4.3 | Oxidación interna | 35 |
| 3.5 | Formas de corrosión | 36 |
| 3.5.1 | Corrosión uniforme | 36 |
| 3.5.2 | Corrosión por picaduras | 37 |
| 3.5.3 | Corrosión Intergranular | 39 |

4 CONTROL DE LA CORROSIÓN

| | | |
|---------|---|----|
| 4.1 | Diseños anticorrosión | 43 |
| 4.2 | Mejora de las características del metal | 46 |
| 4.3 | Recubrimientos protectores no metálicos | 48 |
| 4.3.1 | Recubrimientos interiores | 48 |
| 4.3.2 | Recubrimientos exteriores | 49 |
| 4.3.3 | Espesor del recubrimiento | 49 |
| 4.3.4 | Recubrimientos orgánicos gruesos | 50 |
| 4.3.4.1 | Recubrimientos laminados | 50 |
| 4.3.4.2 | Recubrimientos líquidos | 50 |
| 4.3.4.3 | Recubrimientos sólidos | 51 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.3.5 | Recubrimientos orgánicos delgados | 51 |
| 4.3.5.1 | Alquidáticos | 54 |
| 4.3.5.2 | Hule clorado | 55 |
| 4.3.5.3 | Polietileno clorosulfonado | 56 |
| 4.3.5.4 | Uretános | 56 |
| 4.3.5.5 | Silicones | 57 |
| 4.3.5.6 | Epóxicos | 57 |
| 4.3.5.7 | Epóxicos-alquitrán de hulla | 59 |
| 4.3.5.8 | Vinílicos | 59 |
| 4.3.6 | Recubrimientos inorgánicos | 61 |
| 4.4 | Recubrimientos protectores metálicos | 62 |
| 4.4.1 | Preparación de las superficies | 62 |
| 4.4.1.1 | Desengrasado | 63 |
| 4.4.1.2 | Descascarillado | 65 |
| 4.4.1.3 | Pulimento | 66 |
| 4.4.2 | Normas para la preparación de superficies | 68 |
| 4.4.3 | Métodos de galvanización | 70 |
| 4.4.3.1 | Inmersión | 70 |
| 4.4.3.2 | Cementación | 74 |
| 4.4.3.3 | Electroplaqueado | 75 |
| 4.4.3.4 | Proyección | 76 |

5 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | Identificación de los elementos con riesgo de corrosión | 81 |
| 5.2 | Análisis del medio corrosivo | 81 |
| 5.3 | Alternativas de protección | 83 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 5.3.1 | Protegiendo equipos y estructuras de la corrosión desde su diseño | 84 |
| 5.3.2 | Protección por medio de recubrimientos | 85 |
| 5.3.3 | Protección catódica | 86 |
| 5.3.4 | Uso de inhibidores contra la corrosión de calderas | 90 |
| 5.3.4.1 | precaldera | 91 |
| 5.3.4.2 | Caldera | 92 |
| 5.3.4.3 | Post- caldera | 97 |
| 5.3.5 | Protección de cables de alambre de acero de la corrosión | 99 |
| 5.3.5.1 | Orígenes del ataque de la corrosión | 100 |
| 5.3.5.2 | Estructuras de los cables de alambre | 101 |
| 5.3.5.3 | Revestimientos contra la corrosión | 102 |
| 5.3.5.4 | Mantenimiento preventivo | 103 |
| 5.3.5.5 | Mantenimiento durante el servicio | 104 |
| | CONCLUSIONES | 107 |
| | RECOMENDACIONES | 109 |
| | BIBLIOGRAFÍA | 111 |
| | ANEXOS | 113 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

| | | |
|-----|--|-----|
| 1. | Proceso anódico | 3 |
| 2. | Proceso catódico | 4 |
| 3. | Proceso combinado anódico – catódico | 4 |
| 4. | Diagrama simplificado de pourbaix en el sistema hierro – agua | 8 |
| 5. | Disminución de la corriente de corrosión en una celda de aluminio hierro (25 ^o C) | 13 |
| 6. | Reacciones metal-ambiente corrosivo | 16 |
| 7. | Esquema de una corrosión electroquímica típica | 24 |
| 8. | Tasa de corrosión (corriente) | 27 |
| 9. | Oxidación del magnesio puro en oxígeno | 34 |
| 10. | Corrosión uniforme | 37 |
| 11. | Corrosión por picaduras | 39 |
| 12. | Corrosión Íntergranular | 40 |
| 13. | Zonas de ataque localizado por mal ajuste y suciedad | 45 |
| 14. | Efecto del cromo sobre la disminución de la velocidad de la corrosión en aleaciones con base de hierro | 47 |
| 15. | Corte transversal de la cabeza de la pistola de alimentación por alambre | 78 |
| 16. | Equipo portátil moderno de metalización | 79 |
| 17. | Curva de polarización en la protección catódica | 88 |
| 18. | La humedad puede penetrar fácilmente en el tejido abierto y destruir los torones en un cable de acero | 101 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 19. | Estructura de un cable de acero, mostrando zona de ataque entre los torones | 102 |
| 20. | Forma errónea de desenrollar un cable de acero dando como resultado la formación de cocas y abertura de los torones | 104 |
| 21. | Forma correcta de desenrollar un cable de acero, limpieza y lubricación del mismo | 105 |

TABLAS

| | | |
|------|--|----|
| I. | Serie galvánica de algunos metales | 2 |
| II. | Comparación entre la serie galvánica en agua de mar y serie electromotriz | 6 |
| III. | En la corrosión química hay pocos casos que tienen buen éxito | 22 |
| IV. | Pérdida de peso de zinc y el acero en condiciones de acoplado Y no acoplado | 26 |
| V | Resistencia relativa a la corrosión de varios metales y aleaciones | 48 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Significado |
|------------------------------------|-----------------------|
| E | Electrón |
| Zn | Zinc |
| Zn²⁺ | Ión de zinc |
| Fe | Hierro |
| Fe²⁺ | Ión férrico |
| H | Hidrógeno |
| H⁺ | Ión hidrógeno |
| H₂ | Molécula de hidrógeno |
| O₂ | Molécula de oxígeno |
| H₂O | Agua |
| OH⁻ | Ión hidroxilo |
| Fe₂O₃ | Óxido férrico |

| | |
|-------------------------------------|----------------------|
| Fe₂OH⁻ | Anhídrido ferroso |
| NaOH | Hidróxido de sodio |
| SO₂ | Sulfito |
| H₂SO₄ | Ácido sulfúrico |
| H₂SO₃ | Ácido sulfuroso |
| CO₂ | Dióxido de carbono |
| SO₄ | Sulfato |
| NH₃ | Amonio |
| NCl | Cloruro de nitrógeno |
| NO₂ | Dióxido de nitrógeno |
| FeO | Óxido de Hierro |
| Fe₂O₃ | Óxido férrico |
| ZnO | Óxido de zinc |
| HCl | Ácido clorhídrico |
| ppm | Partes por millón |

| | |
|------------|------------------|
| °C | Grado centígrado |
| mm | milímetro |
| cm. | Centímetro |
| Kg. | Kilogramo |

GLOSARIO

| | |
|--------------------|--|
| Abrasión | Desgaste de una superficie por factores externos, tales como frotamiento, raspado, erosión y otras formas de contacto mecánico |
| Abrasivo | Cuerpo duro que se usa, pulverizado o aglomerado para pulimentar |
| Acabado | Término genérico usado en pinturas, normalmente expresa la capa final de recubrimiento aplicado a un objeto |
| Acople | Unir entre si dos piezas de modo que se ajusten exactamente |
| Adhesión | Capacidad de un recubrimiento de unirse y permanecer fijo a un sustrato |
| Aglutinante | De aglutinar, unir íntimamente dos cosas |

| | |
|----------------------|--|
| Agrietamiento | Falla de la pintura evidenciada por la formación de grietas agua o solventes |
| Airless | Proceso de atomización en donde no se usa aire, sino que la pintura es forzada a muy alta presión a través del orificio de la pistola |
| Albañales | Canales o alcantarillas |
| Aleación | Unión de dos metales por medio de la fusión |
| Ánodo | Polo o electrodo positivo al que se dirige el anión o lón con carga negativa |
| Anticorrosivo | Es el recubrimiento específicamente formulado para proteger un metal de la corrosión |
| ASTM | Es la organización norteamericana encargada de fijar las normas en distintos campos industriales, reconocida a nivel mundial, las letras corresponden a las iniciales en ingles "American Society for testing and materials" |

| | |
|-----------------------|---|
| Atomización | Sistema de aplicación de pinturas en donde el producto se pulveriza en una niebla muy fina, por medio de una pistola que muchas veces usa aire comprimido |
| Bituminoso | Que tiene betún |
| Blanqueamiento | Fenómeno de aparición de manchas de color más claro que el contexto y con pérdida de brillo, ocasionada por la evaporación de solventes |
| Catalizador | Acción que ejercen ciertos cuerpos en las reacciones químicas de otros sin sufrir ellos mismos modificaciones. (Ej. Secado) |
| Cátodo | Polo negativo de un aparato eléctrico, contrario al ánodo |
| Cocas | Vuelta de un cabo o hilo enredado, hacerse cocas en una cuerda o cable |
| Colorante | Sustancia que imparte color a un recubrimiento, se distingue de un pigmento en que es totalmente soluble |

| | |
|-----------------------|---|
| Cubrimiento | Capacidad de tapar, encubrir u opacar una superficie |
| Disolvente | Dícese del líquido que disuelve, es decir divide las moléculas de un sólido |
| Dureza | Habilidad de una capa de pintura de resistir el rayado, cortaduras o penetración por un objeto duro |
| Electrodo | Extremidad de cada uno de los conductores fijados en los polos de un generador eléctrico |
| Electrolito | Medio que facilita la conducción eléctrica |
| Electromotriz | Que desarrolla electricidad bajo la influencia de una acción química o mecánica |
| Electroquímica | Parte de la química que estudia los fenómenos en que desempeña papel preponderante la electricidad |

| | |
|---------------------|---|
| Esmalte | Pintura de aceite de alta calidad, formulada generalmente a base de alquidos medios o modificados y libre de extendedores. Una característica del esmalte es su alto brillo |
| Fem | Fuerza electromotriz |
| Flexibilidad | Capacidad de una capa de pintura de resistir deformaciones o movimientos del sustrato, sin deteriorarse |
| Inhibidor | Impiden o suspenden un proceso |
| Laca | Tipo de recubrimiento de muy rápido Secado y alto brillo, en donde la formación de la película se lleva a cabo por evaporación del solvente. Las lacas utilizan resinas sintéticas de tipo termoplástico, siendo las más conocidas las acrílicas y de nitrocelulosa |
| Pigmento | Sustancia en forma de polvo muy fino que proporciona cubrimiento y color a la pintura, también puede tener funciones como el pigmento permanece dispersado dentro del vehículo, sin solubilizarse. (colorante) |

| | |
|-------------------|---|
| Pilotes | Pieza vertical de cualquier material utilizada en la construcción para transmitir la carga |
| Potencial | Estado eléctrico de un conductor respecto a otro |
| Primario | Mano de fondo que esta en contacto directo con el material que se pinta. Los primarios tienen buena adhesión y propiedades específicas, tales como una función anticorrosivo o de relleno. El primario debe ser protegido de la intemperie con un acabado final |
| Torón | Estructura formada por varios alambres, que a su vez se utilizan para ser enrollados alrededor de un núcleo para formar un cable de acero |
| Vehículo | La parte fluida de una pintura, compuesta por la resina o aceite y los solventes, excluyendo los pigmentos |
| Viscosidad | Resistencia a fluir de un líquido, se relaciona con la consistencia o dificultad de agitar una pintura |

Yute

Materia textil suministrada por las fibras de una planta hindú, parecida al tilo

RESUMEN

La corrosión es un fenómeno natural que afecta en distinto grado a los metales, cuya esencia electroquímica implica la donación de electrones por el metal que se corroe, por lo tanto una determinación eléctrica de la tendencia del metal a donar electrones puede servir como criterio básico de la facilidad de la corrosión.

En los ambientes corrosivos por las distintas variables que intervienen, ya sean Químicas, Físicas o mecánicas; no es posible encontrar un método único para solucionar los distintos casos de corrosión, por lo que a su vez se requiere disponer de distintos métodos anticorrosivos para prevenirla.

La corrosión no se puede evitar, más el objetivo principal está en controlarla, ya sea en el metal, en la interfase o en el medio ambiente corrosivo.

Son muchos los métodos, para los distintos grados de protección que se pretenden los cuales en grado de importancia están; el diseño evitando puntos sensibles de ataque, utilizando recubrimientos protectores metálicos y no metálicos, especificando materiales resistentes a la corrosión, usando protección catódica, y alterando los medios por medio de inhibidores.

En la protección por medio de recubrimientos ya sean metálicos o no metálicos (Galvanizado y Pinturas protectoras), el aspecto más importante radica en la preparación de las superficies para lo cual se han desarrollado normas de limpieza.

OBJETIVOS

- **General**

Realizar un trabajo de investigación que reúna conocimiento y prevención para la corrosión

- **Específicos**

1. Hacer un estudio específico de la corrosión, con el fin de resaltar su importancia, relación y determinación en los proyectos de ingeniería mecánica particularmente.
2. Comprender el fenómeno de la corrosión en toda su extensión, para así tener los conocimientos mínimos para prevenirla desde el momento de diseñar o proyectar cualquier estructura, elemento o partes de equipo y maquinaria.
3. Elaborar un trabajo que sirva de consulta para los estudiantes de la facultad de ingeniería, sin descartar la posibilidad de que sirva como referencia para los cursos afines con el tema, tales como Metalurgia, Diseño de Máquinas, Montaje y mantenimiento de Equipo.

INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre comenzó a explotar los minerales y específicamente aquellos que por su naturaleza química requerían absorber energía para liberarlos del compuesto original, como es el caso de los metales, desde ese momento también descubrió la tendencia del metal en liberar esa energía para regresar a su estado inicial en forma de corrosión.

La corrosión como un fenómeno de degradación de los metales y como consecuencia que afecta todo tipo de construcción que se realice con ellos, resulta ser una variable incomoda de manejar para los ingenieros diseñadores.

La corrosión afecta desde el punto de vista de presentación, así como también, desde el punto de vista estructural, en la construcción de piezas, equipo y maquinaria, cuyos esfuerzos a los que son sometidos pueden en determinado momento representar un riesgo y ser causa de destrucción, accidentes y en fin pérdida de todo tipo de recursos invertidos.

De ahí que entender este fenómeno, conocer los medios donde se produce, los tipos y formas como se presenta, las alternativas de protección que existen para su control y mantenimiento preventivo son principalmente los motivos de estudio e investigación de este trabajo

1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES PARA LA COMPRENSIÓN DE LA CORROSIÓN

La corrosión es un proceso de degradación y por consiguiente, se caracteriza por la disipación de energía en alguna forma. La corrosión de los metales es una consecuencia natural de su existencia temporal en ese estado.

Para alcanzar su estado metálico desde la forma en que se encuentra en la naturaleza (compuestos químicos llamados minerales) requieren absorber y almacenar la energía necesaria, que le permita liberar al metal del compuesto original. Esta cantidad de energía y su capacidad de almacenarla varía de metal a metal. Es relativamente alta en metales como el magnesio, aluminio, hierro y relativamente baja en metales como el cobre y la plata.

La relativa dificultad de extraer los metales de sus minerales en términos de requerimientos de energía y su tendencia relativa consecuente a liberar esta energía en forma de corrosión se refleja por la posición de los metales puros en una lista donde la energía requerida determina su posición. (tabla I).

La energía almacenada se libera, por lo general en forma de corrosión. Un ciclo típico se ilustra con el hierro, el más común mineral de hierro es la hematita, que es a su vez un óxido de hierro (Fe_2O_3). El producto más común de la corrosión del hierro, el óxido o herrumbre tiene la misma composición química.

Los principios básicos de la corrosión, involucra algunos aspectos electroquímicos.

Habr  flujo de electricidad desde ciertas áreas de la superficie del metal a otras del mismo, en una soluci3n capaz de conducirla tal como el agua de mar o agua dura (electrolito).

Tabla I. Serie galvánica de algunos metales

| | |
|----------|-------------------------|
| | (ACTIVO) |
| POTASIO | REQUIEREN MAS ENERGIA |
| MAGNESIO | |
| BERILIO | |
| ALUMINIO | |
| ZINC | |
| CROMO | PARA CONVERTIR EN METAL |
| HIERRO | SUS MINERALES |
| NIQUEL | |
| ESTAÑO | |
| COBRE | |
| PLATA | |
| PLATINO | REQUIEREN MENOS ENERGIA |
| | (PASIVO) |

Fuente. Rosales Luís. **Uso de recubrimientos anticorrosivos para la industria pagina 15**

1.1. Reacciones an3dicas y cat3dicas

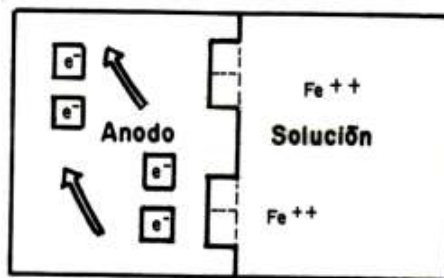
1.1.1. Reacciones an3dicas

El término " nodo" se usa para describir aquella porci3n de la superficie del metal que se corroe y desde la cual la corriente fluye para entrar en la soluci3n (Electrolito).

Cuando ocurre la corrosión; átomos del metal positivamente cargados abandonan la superficie sólida (ánodo) y entran a la solución como iones, abandonando sus cargas negativas correspondientes, en forma de electrones capaces de fluir a través del metal hasta completar su circuito al cátodo donde la correspondiente reacción consume esos electrones (figura 1).



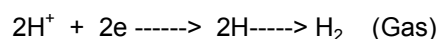
Figura1. Proceso anódico



Fuente. R. M Burns y w.w Bradley. **Recubrimientos protectores de los metales** pagina 12

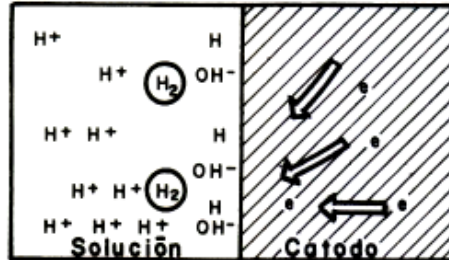
1.1.2 Reacciones catódicas

El término "cátodo" se usa para describir las superficies del metal en la que la corriente entra desde la solución. Los electrones generados por la formación de iones metálicos han pasado por el metal hacia la superficie del mismo inmersas en el electrolito. Aquí restituyen el balance eléctrico del sistema mediante su reacción y neutralización de los iones hidrógeno en el electrolito.



Los iones hidrógeno pueden ser reducidos a átomos y frecuentemente se combinan con los electrones en la superficie del cátodo en una reacción que los convierte en gas hidrógeno (Figura 2).

Figura 2. Proceso catódico

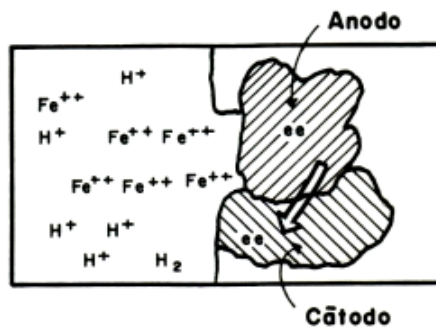


Fuente. R. M Burns y w.w Bradley. **Recubrimientos protectores de los metales** pagina 13

1.1.3 Proceso combinado ánodo – cátodo

Si pudiésemos magnificar la imagen de una pieza de hierro con solamente un ánodo y un cátodo en una solución ácida, podríamos ver electrones generados por la formación de iones ferrosos fluyendo a través del metal desde el área anódica a la catódica (figura 3).

Figura 3. Proceso combinado Anódico-Catódico



Fuente. R. M Burns y w.w Bradley. **Recubrimientos protectores de los metales** pagina 14

En la superficie catódica los electrones se encontrarán con los iones hidrógeno de la solución.

Un Ion hidrógeno aceptará un electrón y se convertirá en un átomo de hidrógeno que podrá entrar al metal y guiar el quebramiento del hidrogeno, o como en muchos casos combinarse con otro y formar una molécula de gas hidrógeno que podrá pegarse o liberarse como una burbuja desde la superficie catódica.

Como este proceso continúa, la oxidación del hierro ocurre en las superficies anódicas y la reducción del hidrógeno en las catódicas.

1.2 Potencial de electrodo

Esta noción es quizá una de las mas difíciles de entender de toda la electroquímica. Hay que subrayar primeramente, aunque en la práctica corriente se hable de potencial de electrodo, que esta expresión es incorrecta o por lo menos demasiado resumida. No hay " potencial de un electrodo", por la sencilla razón de que no se sabe medir un potencial absoluto, como para las temperaturas, solo sabemos medir las diferencias.

La esencia de la corrosión electroquímica consiste en una reacción anódica que implica la donación de electrones por el metal que se corroe. Una determinación eléctrica de la tendencia del metal a donar electrones puede servir, por lo tanto, como un criterio básico de la facilidad de corrosión, expresada como potencial de electrodo del sistema que se corroe.

En la figura 1, por ejemplo, cuando un átomo de hierro pasa a la solución como un Ion Fe^{2+} , quedan dos electrones en la probeta de hierro y contribuyen a la creación de un potencial eléctrico.

En relación con los valores cuantitativos de estos potenciales es preciso tener en cuenta dos puntos importantes; en primer lugar, que la muestra metálica y su solución constituyen solamente la mitad de una pila completa y, por lo tanto, debe elegirse una segunda semipila para formar un sistema electroquímico sobre el que se puedan realizar medidas.

Generalmente se elige una semipila o semielemento normal de hidrógeno consistente en hidrógeno gaseoso H_2 a una atmósfera de presión, e iones hidrógeno H^+ a una actividad igual a uno (concentración) en contacto con un electrodo de platino especialmente preparado.

Tabla II. Comparación entre la serie Galvanica en agua de mar y serie Electromotriz

| Serie Galvánica en agua de mar | Serie Electromotriz | |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------|
| Extremo Anódico (Corroído) | | |
| Magnesio | Li , Li ⁺ | 3.02 voltios |
| Aleaciones de Magnesio | k , k | 2.92 voltios |
| Zinc | Na , Na ⁺ | 2.71 voltios |
| Acero Galvanizado | Mg , Mg | 2.34 voltios |
| Aluminio | Al , Al ⁺⁺ | 1.67 voltios |
| Cadmio | Zn , Zn ⁺⁺ | 0.76 voltios |
| Aleaciones de Aluminio | Cr , Cr ⁺⁺ | 0.71 voltios |
| Acero | Fe , Fe ⁺⁺ | 0.44 voltios |
| Hierro Forjado | Cd , Cd ⁺⁺ | 0.40 voltios |
| Hierro Fundido | Co , Co ⁺⁺ | 0.28 voltios |
| Soldadura 50-50 | Ni , Ni ⁺⁺ | 0.25 voltios |
| Acero Inoxidable 18-8 (activo) | Sn , Sn ⁺⁺ | 0.14 voltios |
| Plomo | Pb , Pb ⁺⁺ | 0.13 voltios |
| Estaño | H ₂ , H ⁺ | 0.00 Referencia |
| Metal Muntz | Bi , Bi ⁺⁺⁺ | - 0.23 voltios |
| Níquel | Cu , Cu ⁺⁺ | - 0.34 voltios |
| Latón amarillo | Hg , Hg ⁺⁺ | - 0.80 voltios |
| Latón rojo | Ag , Ag ⁺⁺ | - 0.80 voltios |
| Cobre | Pt , Pt | - 1.2 voltios |
| Cuproníquel 7-30 | Au , Au | - 1.7 voltios |
| Acero Inoxidable 18-8 (pasivo) | | |
| Extremo Catódico (protegido) | | |

Los voltajes corresponden a la reacción de oxidación

Fuente. Guy Albert g. **Metalurgia física para Ingenieros pagina 331**

En la serie Electromotriz (tabla II) en la que se toma el hidrógeno como referencia, puede apreciarse que la semipila (Fe, Fe²⁺) posee un valor normal de equilibrio $E^0 = + 0.44$ voltios.

El segundo punto relativo a los potenciales de electrodo, está ya implicado al fijar el valor +0.44 voltios. Es decir, a la naturaleza de la solución corrosiva en contacto con el hierro se le ha dado un valor normal conveniente, de actividad unitaria con respecto a los iones Fe²⁺.

Si la concentración iónica, se reduce por debajo de este valor patrón, el hierro mostrará una mayor tendencia a entrar en solución, y por consiguiente, el potencial de electrodo aumentará desde el valor normal, E^0 a un nuevo valor, E, dado por la relación

$$E = E^0 - \frac{0.059}{n} \log (c) \quad (1)$$

donde (c) es la concentración de iones Fe²⁺ en unidades de mol por litro y (n) es la valencia del ión respectivo (para el caso del hierro, n = 2).

1.3 Diagrama de pourbaix (E en función del PH)

El diagrama de potencial de electrodo en función de la concentración del Ión hidrogeno (E en función del PH) diagrama de pourbaix, es un ejemplo importante del empleo de la ecuación (1), para la comprensión de la corrosión.

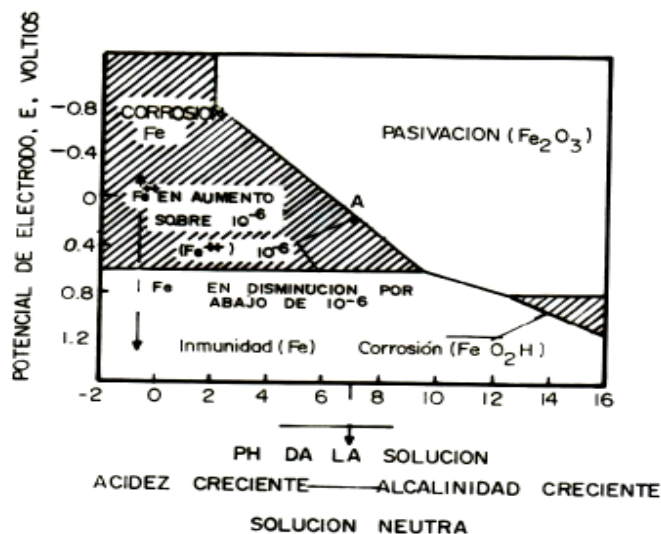
En este diagrama se resumen los equilibrios químicos que constituyen la base del comportamiento de un metal dado ante la corrosión.

PH se denomina así "El logaritmo de base 10 del inverso de la concentración en ión hidrógeno de una solución".

El PH constituye una medida de la acidez de la solución; para PH =7 tenemos una solución neutra, mientras que para valores menores y mayores a éste, la solución es ácida o alcalina respectivamente.

Analizaremos el caso de la corrosión del hierro por el agua, el diagrama tiene la forma que se muestra en la figura 4 y separa las zonas correspondientes a tres tipos diferentes de comportamiento: corrosión, inmunidad a la corrosión y pasivación.

Figura 4. Diagrama simplificado de Pourbaix para el sistema hierro - agua



Fuente. Guy Albert g. **Metalurgia física para Ingenieros pagina 328**

Con ayuda de la figura (1), y del valor conocido $E^0 = +0.44$ voltios para el hierro, es fácil comprender la existencia de la amplia zona denominada "corrosión".

Cuando el hierro está en contacto con una solución acuosa, los potenciales de electrodo próximos a E^0 (o algebraicamente menores) corresponden a un equilibrio con grandes concentraciones de iones - hierro en solución.

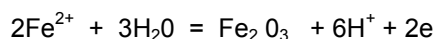
Por lo tanto, puede concluirse de que el hierro tenderá a entrar rápidamente en solución (corroerse) cuando está en contacto con el agua, en este intervalo de potenciales de electrodo. Los potenciales en cuestión no precisan ser aplicados artificialmente, puesto que se desarrollan de forma natural, como resultado de la reacción de la corrosión. Por ejemplo cuando se sitúa un trozo de hierro en un recipiente con agua, el potencial de electrodo es de +0.45 voltios, aproximadamente.

Si se modifica convenientemente el potencial natural de electrodo por medio de una fuente eléctrica exterior, es posible hacer pasar a la probeta de hierro a la región que en la figura (4) se denomina "inmunidad", resultando estar esencialmente exenta de ataque corrosivo. El cambio de corrosión a inmunidad no es brusco, representando la línea divisoria en $E = +0.62$ voltios, un valor arbitrario pero útil basado en el siguiente razonamiento: si la concentración de equilibrio de los iones Fe^{2+} es suficientemente pequeño, $C = 10^{-6}$, la cantidad de hierro que se disuelva será despreciablemente pequeña pudiendo decirse que el hierro es inmune a la corrosión. El valor de potencial correspondiente a $C = 10^{-6}$ puede calcularse ahora fácilmente utilizando la ecuación (1).

$$E = E^0 - \frac{0.059 \log. 10^{-6}}{2} = 0.44 - \frac{0.0295 (-6)}{2} = E = 0.062 \text{ voltios}$$

De este modo, a potenciales de electrodo de +0.62 voltios o mayores, el hierro es, efectivamente inmune a la corrosión. Este fenómeno es la base de la protección catódica contra la corrosión.

De la misma forma que la reacción $\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2e$ conduce a la línea horizontal de ordenada $E = 0.62$ voltios del diagrama de Pourbaix (Figura 4), otras posibles reacciones entre el hierro y el agua, determinan las restantes líneas limítrofes. La reacción de pasivación que conduce a la línea inclinada del centro del diagrama, es de especial importancia. Esta es una reacción en la que intervienen iones Fe^{2+} y una capa de Fe_2O_3 que se forma sobre la superficie del hierro.



A continuación se demuestra como esta reacción puede mantener la concentración de iones Fe^{2+} por debajo de $(\text{Fe}^{2+}) = 10^{-6}$ en la región denominada "pasivación".

Utilizando los valores termodinámicos conocidos de las especies químicas que intervienen, se puede obtener una relación entre las concentraciones (Fe^{2+}) y (H^+) que existen en equilibrio con una capa sólida de Fe_2O_3 . Un ejemplo para caso especial $E = 0$ ilustra el método de cálculo, siendo la relación numérica.

$$\frac{(\text{H}^+)^6}{(\text{Fe}^{2+})^2} = 10^{-24}$$

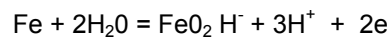
Recordando que el valor $(\text{Fe}^{2+}) = 10^{-6}$ se utiliza, por definición como límite de la región de corrosión, se desprende que la concentración de iones H^+ requerida para mantener este valor en equilibrio con una capa de Fe_2O_3 sólido sobre la superficie de hierro es:

$$(\text{H}^+) = (10^{-24} * 10^{-12}) = 10^{-6}$$

Correspondiendo a $\text{pH}=6$ el valor $E = 0$. Este punto está representado por A en la Figura 4.

El grado de protección contra la corrosión que proporciona a un metal la formación sobre su superficie de una capa de un producto de reacción sólido es muy variable y por tanto, la importancia práctica de la pasivación como medio para controlar la corrosión varía correspondientemente de un metal a otro.

Según puede apreciarse en la Figura 4, hay una segunda región de corrosión a la derecha del diagrama, resultado de reacciones tales como:



Con la producción de iones estables en soluciones alcalinas. Aunque este tipo de corrosión se produce a temperaturas elevadas, el hecho de que su velocidad se haga despreciablemente pequeña a temperaturas normales es una circunstancia afortunada, por lo que se pueden utilizar industrialmente recipientes de hierro para el manejo de soluciones alcalinas.

En condiciones especiales, se plantea el problema de corrosión conocido como fragilización cáustica. Por ejemplo, una caldera de vapor a alta temperatura puede funcionar con agua especialmente tratada para mantener un valor de pH en el intervalo de seguridad aproximado de 10 a 13. Sin embargo en las proximidades de hendiduras, en los remaches puede concentrarse el álcali produciéndose corrosión muy acelerada, si el metal, en este punto contiene tensiones no uniformes. Otra complicación es la descomposición del producto de corrosión, Na_2FeO_2 en el caso de una solución de hidróxido de sodio, con la regeneración de NaOH y la liberación del hidrógeno naciente.

Entonces el acero puede absorber el hidrógeno produciéndose la condición de baja ductibilidad conocida como fragilización por hidrógeno.

1.4 Tasas de corrosión

Hemos visto que la Fem. o potencial de electrodo indica la tendencia a la corrosión tanto catódica como anódica, pero no controla directamente la tasa de corrosión. Por ejemplo, una batería es simplemente un caso de corrosión controlada. Si preguntásemos por una batería de 1.5 voltios en una tienda podríamos escoger entre muchos tamaños, todos los cuales dan 1.5 voltios, sin embargo la vida en amperios-hora de las baterías sería completamente diferente. Así, las tasas de corrosión serían diferentes debido a los diversos tamaños de la batería y a los diversos materiales de que están fabricadas.

En efecto, la tasa de corrosión depende de la ley de Faraday:

Peso del metal que se esta disolviendo: $G = K I T$ (2),

Donde $k = \frac{\text{peso atómico del metal}}{\text{numero de electrones transferidos} \times 96500 \text{ amp.-seg.}}$

$I =$ corriente (en amperios)

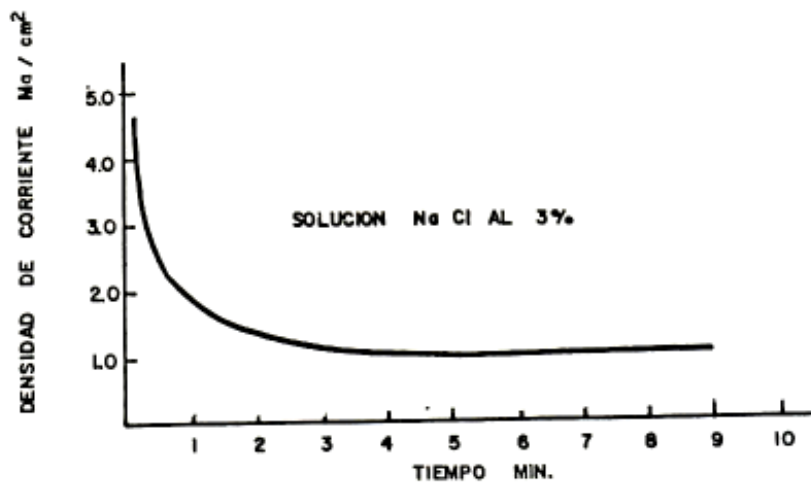
$T =$ tiempo(en segundos)

En la corrosión generalmente estamos interesados en la pérdida de peso de un área determinada por unidad de tiempo. Por lo tanto, dividiendo ambos lados de la ecuación (2) por el área nos da la tasa de corrosión que es igual a una constante por la densidad de la corriente: (corriente (amp.) /área (cm²)). en otras palabras, la tasa de pérdida de peso de un área determinada es proporcional a la densidad de la corriente.

Si determinamos la densidad de corriente para una celda de corrosión aluminio-hierro, encontramos que la corriente inicial es relativamente alta (4ma/cm^2) y que gradualmente decae hasta alcanzar 1 ma/cm^2 , después de 6 minutos (Figura 5). Además la Fem. cambia durante este periodo.

Tal disminución en la tasa de corrosión en ese tiempo está producida por la polarización y es muy importante en el control de la corrosión. La polarización depende mucho de la naturaleza del metal y de las condiciones del medio (composición, PH, etc.) y así como de la corriente que atraviesa el sistema.

Figura 5. Disminución de la corriente de corrosión en una celda galvánica aluminio-hierro (25^0 C.)



Fuente. Flinn Richard A y Trojan Paul K. **Materiales de ingeniería y sus aplicaciones** pagina 411

1.5 Unidades de corrosión

Generalmente se utilizan las siguientes unidades:

- mdd: miligramos perdidos por decímetro cuadrado por día
- ppa: pulgadas corroídas por año
- mpa: mils. corroídos por año (1 mil. = 0.001 pulgada)

Los dos últimos términos son preferibles porque nos permiten visualizar fácilmente el efecto a largo plazo. Estos valores se aplican a la corrosión uniforme y pueden utilizarse únicamente en el cálculo si no hay corrosión no uniforme, tal como la corrosión en grietas.

2. AMBIENTES CORROSIVOS

El medio ambiente corrosivo, desempeña un papel fundamental y condiciona el comportamiento del metal, entre las características químicas esenciales del medio ambiente, señalaremos:

- a) La composición del medio con la concentración de cada componente, no olvidando las impurezas que pueden tener un papel más importante que los componentes principales.
- b) En el caso de un líquido el PH
- c) En el caso de una solución, la dosificación en oxígeno o gases disueltos, que a su vez pueden depender de la presión exterior .
- d) La presencia de inhibidores o aceleradores de la corrosión.

Los efectos de estos factores químicos pueden depender de las condiciones físicas del medio mismo:

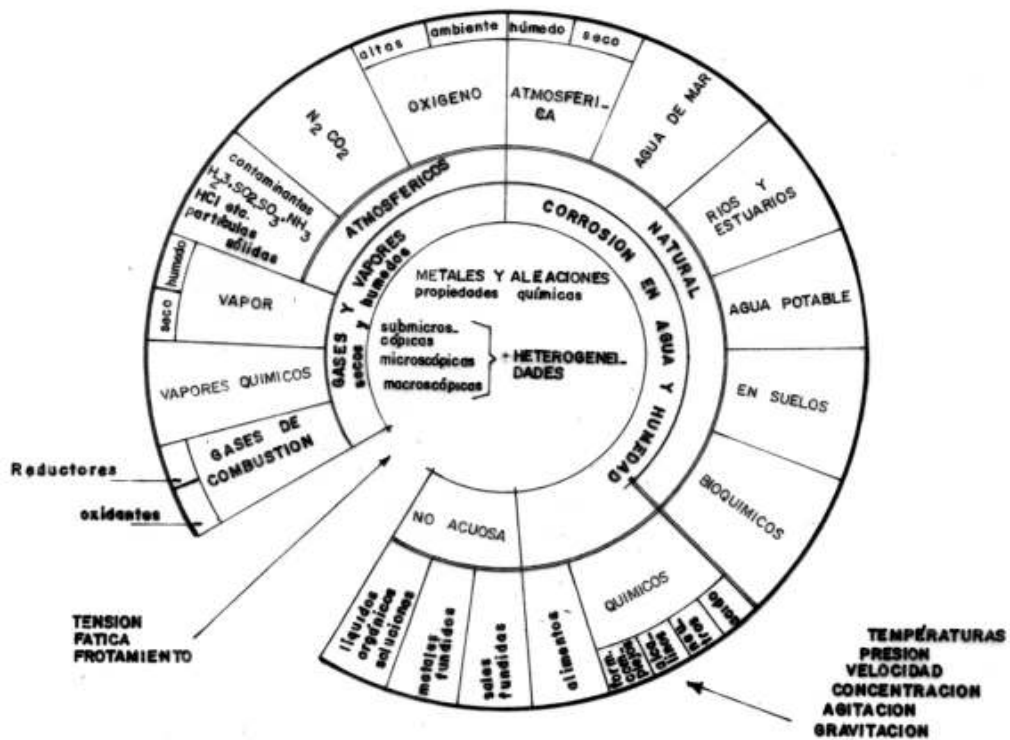
- a) De su estado físico
- b) De la temperatura, no solo del medio, si no también del metal, que muchas veces son diferentes.
- c) Del movimiento relativo del medio.

La figura 6 nos muestra el panorama tan vasto de relaciones metal ambiente que se presentan en la práctica.

Observando el centro de la figura 6, se ve que el metal puede tener heterogeneidades que influyen en el proceso de corrosión cambiando sus propiedades químicas.

Observamos que los metales pueden estar sujetos a influencias mecánicas, tensión, fatiga, frotamiento, etc.

Figura 6. Reacciones metal-ambiente corrosivo



Fuente. Velásquez Rergis Pedro. **Corrosión e incrustación en tuberías** pagina 492

Lo anterior en referencia al metal, en el medio ambiente el número de parámetros aumenta considerablemente y si además añadimos las variables de concentración, presión, temperaturas, etc., llegamos a la siguiente conclusión.

De que el número de variables que afectan los problemas de corrosión es tan grande, que es imposible encontrar métodos únicos que ofrezcan solución para todos los casos posibles, por tanto el número de métodos anticorrosivos también tiene forzosamente que ser muy numeroso.

2.1 Atmósfera

Aunque la corrosión atmosférica no es espectacular, el costo sí lo es, ascendiendo a varios billones de dólares anuales.

Después de mucha experimentación los Ingenieros especializados en corrosión han encontrado tres diferentes tasas de corrosión en ambientes industriales, marinos y rurales.

2.1.1 Atmósferas industriales

Las atmósferas industriales interiores, encierran serio peligro solo cuando contienen gases corrosivos, tales como el gas de hulla quemado, los óxidos de azufre y de otras materias químicas existentes en el gas, las cuales se combinan con el vapor de agua creado por el calentamiento del aire. Esta atmósfera tiene entonces, efecto corrosivo sobre los metales existentes en el local y es provocada generalmente por una mala ventilación.

Los problemas en el ambiente industrial exterior provienen del SO_2 , el cual se convierte en H_2SO_4 y H_2SO_3 .

La mayor corrosión derivada de los gases, la sufren los materiales expuestos a la descarga del gas a la atmósfera por las chimeneas de plantas industriales y factorías químicas.

Antes que los gases sean descargados, muchas industrias usan purificadores de aire.

Se emplea agua en estos sistemas y si bien ésta elimina gran parte del material contaminante, debe comprenderse que el aire saturado arrastra cierta cantidad de materias químicas nocivas. La humedad puede adherirse a las estructuras metálicas e iniciar la corrosión.

2.1.2 Atmósferas marinas y rurales

En las atmósferas marinas el principal problema es la salpicadura de sal.

En las atmósferas rurales la lluvia y el polvo causan los problemas principales. Recientemente el cambio en la atmósfera ha cambiado el tiempo de vida útil de las canales galvanizadas de los aleros. En el pasado, en zonas altamente industrializadas no era raro tener que reemplazarlas cada cinco años.

La preocupación actual por la contaminación del aire ha dado como resultado un aumento en la vida de los canales a más de 20 años, lo cual se compara favorablemente con su lapso de vida en una atmósfera rural.

Agua

El agua es la causa de muchos problemas de corrosión, ningún material de construcción o recubrimiento es ideal para todas las exposiciones en agua. El problema de la corrosión del agua se complica por la existencia de muchos tipos de aguas, creando cada una de ellas sus propias condiciones de ataque.

Las aguas de pantano son ordinariamente ácidas y corroen rápidamente el hierro y el concreto. Las aguas sulfurosas reaccionan rápidamente con los metales como el hierro, el bronce, cobre, etc.

Aguas duras o de alto contenido de sales son aguas de alta conductividad y usualmente con una gran cantidad de iones cloruro, los cuales forman rápidamente las áreas anódicas y catódicas sobre el hierro, resultando severos picados.

Las aguas de alta pureza disuelven rápidamente el calcio del concreto, dejando expuestos los agregados y destruyendo así la estructura, al equilibrarse el calcio en el agua ya no seguirá disolviendo más, por suerte casi toda el agua (excepto la que venga de los deshielos), es suficientemente dura o contiene bastante calcio para prevenir cualquier reacción.

El ataque del agua fresca varía grandemente dependiendo de las sales y gases que lleva disueltos. Los principales contaminantes son iones de cloro, compuestos de azufre, compuestos de hierro y sales de calcio. Las aguas de los ríos y lagos pueden contener una gran variedad de sales naturales, ácidos y otras materias químicas derivadas de las estructuras geológica y mineral de sus lechos y riberas.

También viven bacterias en el agua dulce. Todo esto puede tener efectos corrosivos considerables sobre los materiales sumergidos. Antes de tomar decisiones acerca del empleo de cualquier tratamiento protector particular para instalaciones estáticas tales como piloteados, muelles, tuberías o cables, deberá obtenerse el análisis químico del agua para asegurarse que se aplique la cubierta u otro tratamiento más apropiado y efectivo.

Se comprenderá que debe hacerse un análisis cuando el río o lago recibe la descarga de líquidos o sólidos de desecho de albañales, fábricas, plantas de energía, etc.

No solamente son los metales sumergidos en agua, los que están expuestos al asalto de la corrosión; metales que contengan o encierren agua como tuberías, calderas, condensadores, etc., también requieren el mantenimiento protector.

El hierro fundido y el dúctil se emplean comúnmente para la tubería de agua.

En las uniones críticas tales como válvulas, para la superficies de empate, generalmente se especifican aleaciones de cobre. En general en casos de descincificación o desaluminización, se emplean aleaciones con más del 80% de cobre. También se emplean monel, aluminio, algunos aceros inoxidable y cuproníquel, dependiendo de su aplicación.

El agua de mar ataca el acero común y el hierro fundido bastante rápidamente, utilizándose la protección con pintura o un ánodo de sacrificio; por ejemplo: para los barcos marinos se atornillan ánodos de sacrificio de zinc a determinados intervalos en el casco. El picado ataca el acero inoxidable y el latón con menos cobre puede descincificarse, el titanio tiene excelente resistencia.

Asalto subterráneo

El asalto corrosivo motivado por el suelo se dirige principalmente, contra tuberías sepultadas, cables y cimientos mecánicos, tales como pilotes encajados.

Se ha descubierto recientemente que cuando los pilotes de acero se colocan profundamente en terreno que no haya sido "perturbado" (volteado) el metal se deteriora (corroe) con lentitud.

Esto se atribuye a la falta de oxígeno en el suelo. Cuando se ha removido el terreno y después se ha repuesto, como cuando se tienden tuberías en zanjas o fosos, el oxígeno penetra en el terreno y ayuda a iniciar la corrosión electroquímica.

Otra causa de corrosión electroquímica subterránea es la presencia de corrientes eléctricas "vagabundas". Estas se deben a fugas de electricidad de las líneas ferroviarias y fuentes similares. En estos casos es obvia la aplicación de una cubierta aislante de los objetos metálicos sepultados.

Lo mismo que cuando se trata de agua dulce, el suelo debe analizarse antes de introducir metales en él. La tierra contiene toda clase de ácidos y de otras sustancias químicas y minerales corrosivos. Solamente una análisis del suelo puede revelar que tipo de acción protectora debe tenerse en cuenta.

La naturaleza corrosiva del suelo puede determinarse usando electrodos especiales que se hincan profundamente en el terreno; los electrodos se conectan a un instrumento eléctrico que señalan una lectura del potencial electroquímico.

2.2 Substancias Químicas

Las industrias químicas y del petróleo tienen los problemas más graves, en la industria del petróleo; el agua salada, los sulfatos, ácidos orgánicos y otros contaminantes aceleran la corrosión.- En ella se emplea acero inoxidable, estelita (que es una aleación a base de cobalto) y monel.

Tabla III. En la corrosión química hay pocos casos específicos que tienen buen éxito.

| Sustancia química corrosiva | Material Resistente |
|--------------------------------|----------------------|
| Acido Nítrico | Acero Inoxidable |
| Soluciones Oxidantes calientes | Titanio |
| Soluciones Cáusticas | Aleaciones de níquel |
| Acido Sulfúrico concentrado | Acero |
| Acido Sulfúrico diluido | Plomo |
| Agua Pura Destilada | Estaño |

Fuente. Flinn Richard A y Trojan Paul K. **Materiales de ingeniería y sus aplicaciones** pagina 431

3. TIPOS Y FORMAS DE CORROSIÓN

Exceptuando algunos casos, principalmente de corrosión por gases a alta temperatura, en los que se puede decir que la corrosión es puramente química es muy difícil a priori, en la mayoría de los casos, rechazar la posibilidad de intervención de un proceso electroquímico en la corrosión de un metal.

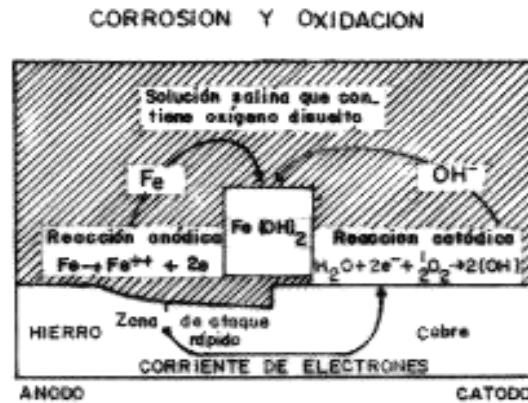
Se podría por lo demás, explicar desde un punto de vista teórico, que la diferencia entre reacciones químicas y electroquímicas no es necesario.

3.1 Corrosión electroquímica

El tipo de corrosión que más frecuentemente tiene lugar ocurre a temperatura ambiente o a una temperatura próxima a ella, como resultado de la reacción de los metales con el agua o con soluciones acuosas de sales, ácidos o bases.

Estas reacciones forman parte del amplio campo de la corrosión electroquímica. Aunque existen muchas variantes de este tipo de corrosión la acción de una solución salina aireada en la unión entre una pieza de hierro y otra de cobre ilustra las características esenciales (Figura. 7).

Figura 7. Esquema de una corrosión electroquímica típica



Fuente. Guy Albert g. **Metalurgia física para Ingenieros** pagina 326

En ella puede apreciarse que hay dos reacciones principales, una en el ánodo y otra en el cátodo. Las anódicas son siempre reacciones de oxidación y por tanto, tiende a destruir el metal anódico disolviéndolo como un ion o haciendo que vuelva a un estado combinado, como por ejemplo, un óxido.

Las reacciones catódicas son siempre reductoras y corrientemente, no afectan al metal catódico, puesto que la mayor parte de los metales no pueden reducirse más. Los electrones producidos por la reacción anódica fluyen a través del metal y se consumen en la reacción catódica.

La disposición de los productos de la reacción es, frecuentemente decisiva para controlar la velocidad de la corrosión; puede disolverse o desprenderse como un gas y, en estos casos no inhibe la continuación de la reacción.

En otros casos se forma un compuesto insoluble que puede cubrir la superficie metálica y reducir eficazmente la velocidad de la corrosión posterior.

Sin embargo el compuesto insoluble de la Figura 7, se ha formado a cierta distancia de la zona de corrosión y tiene poco valor protector.

Con la variedad de los casos de corrosión electroquímica, los factores electroquímicos desempeñan un papel muy importante, entre los que se pueden mencionar:

- a. La naturaleza y el lugar del metal en la escala de los potenciales normales (potencial de electrodo) aunque esto no sea más que una indicación de la tendencia a la corrosión.
- b. La naturaleza de las impurezas en el metal o que se pueden depositar.
- c. La conductividad eléctrica del medio.
- d. La existencia de una corriente eléctrica.
- e. La presencia del oxígeno.
- f. La presencia de un medio electrolítico.
- g. La sobre tensión del oxígeno y del hidrógeno sobre el metal en el medio considerado.

De una cierta manera, se puede decir que todo estado de desequilibrio electroquímico del metal puede provocar la corrosión electroquímica y los factores citados pueden acarrear un desequilibrio electroquímico del metal.

Hay que resaltar, que no precisamente tiene que existir un acople de materiales de distinto potencial de electrodo para que se de la corrosión electroquímica, ya que esta se puede dar con la presencia de un solo metal que por su disposición estructural después de distintos procesos metalúrgicos aparezcan diferentes fases en las aleaciones con potenciales electroquímicos distintos; de una manera semejante ocurre con los metales que contienen impurezas.

3.1.1 Corrosión galvánica

En forma general toda corrosión depende de la acción galvánica, pero este término significa específicamente un tipo de corrosión electroquímica que ocurre debido a que dos materiales de diferente potencial de solución están en contacto, como en la Figura. 7.

Existen muchos casos de corrosión galvánica, por ejemplo, los recubrimientos galvanizados en los cuales el miembro más reactivo del par (zinc), se usa deliberadamente como un ánodo de sacrificio, para proteger al otro metal. En el caso común del acero o alambre galvanizado, el acero se recubre con zinc, ya sea sumergiéndolo en zinc fundido o por electro deposición.

Los efectos que aparecen en la tabla IV, se obtuvieron en un experimento en el cual se ensayaron separadamente muestras de zinc y acero de igual tamaño durante el mismo tiempo en la condición adjunta y acoplada.

Tabla IV. Pérdida de peso del zinc y del acero en condiciones de acoplado y no acoplado

| SOLUCION | CAMBIO DE PESO EN CADA MUESTRA | | | |
|--|--------------------------------|-------|----------|-------|
| | NO ACOPLADO | | ACOPLADO | |
| | ZINC | ACERO | ZINC | ACERO |
| 0.05 molar Na ₂ SO ₄ | -0.17 | -0.15 | -0.48 | 0.01 |
| 0.05 molar NaCl | -0.15 | -0.15 | -0.44 | 0.01 |
| 0.005 molar NaCl | -0.06 | -0.10 | -0.13 | 0.02 |

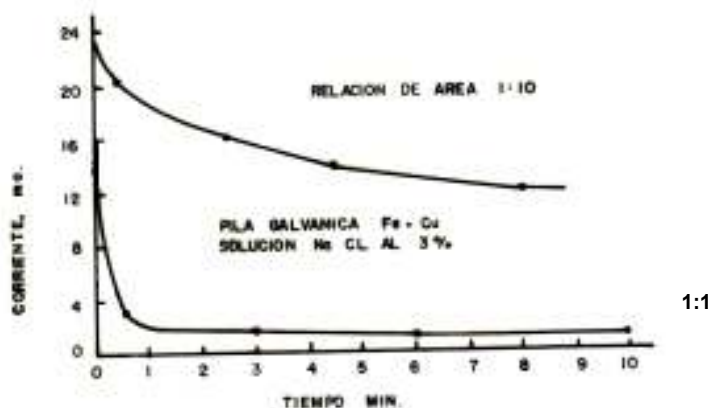
Fuente. Flinn Richard A y Trojan Paul K. **Materiales de ingeniería y sus aplicaciones pagina 418**

Nótese que cuando no están acoplados, tanto el zinc como el acero se corroen en la soluciones, pero cuando se acoplan el zinc protege al acero, corroyéndose a una tasa acelerada tal como un ánodo de sacrificio.

Con frecuencia se usan remaches de un material diferente del de la estructura básica, especialmente, como algo oportuno en las reparaciones. En el caso de remaches de cobre en lámina de acero hay una gran área de ánodo (el acero) y la acción galvánica no es grave. Sin embargo, cuando se utilizan remaches de acero en una lámina de cobre toda la parte metálica se concentra en una pequeña región anódica y hay una gran área para que las reacciones catódicas absorban los electrones. La corrosión es catastrófica, la Fig. 8, muestra el efecto del área ánodo a cátodo en la tasa de corrosión (corriente) en un sistema hierro-cobre.

Por lo tanto se debe evitar el acople galvánico especialmente en sistemas expuestos a soluciones acuosas.

Figura 8. Tasa de Corrosión (Corriente)



Fuente. Flinn Richard A y Trojan Paul K. **Materiales de ingeniería y sus aplicaciones** pagina 420

3.1.2 Corrosión Atmosférica

El aire contiene siempre cierta cantidad de vapor de agua.

A una temperatura determinada, el aire no puede contener más vapor de agua que el valor de saturación, llamado punto de rocío. Si la cantidad de vapor de agua excede el valor de saturación, una parte de este vapor de agua se condensa y se deposita sobre los objetos, en particular sobre las superficies metálicas.

La capa de agua, así depositada sobre un metal, puede ser muy tenue, del espesor de algunas moléculas.

Los gases constitutivos del aire (N_2 , O_2), así como las impurezas gaseosas o sólidas contenidas en el aire (vapores industriales, tales como CO_2 , SO_4 , NH_3 , SH_2 , NCL , NO_2) pueden disolverse en esta película con bastante facilidad, puesto que estos gases son muy solubles en el agua. Ocurre lo mismo para las distintas sales.

Una película líquida muy tenue solo presenta una resistencia muy débil a la difusión del oxígeno del aire a través del electrolito hacia la superficie metálica.

En estas condiciones, la corrosión evoluciona con una intensa despolarización por oxígeno de las regiones catódicas, incluso cuando el electrolito presenta una reacción ácida.

En cambio, la resistencia eléctrica de una capa líquida delgada es muy elevada, de tal manera, que si la diferencia de potencial es bastante elevada entre las regiones catódicas y anódicas, la corriente de corrosión será débil.

A medida que aumenta el espesor de la capa líquida, su resistencia eléctrica disminuye y la corriente de corrosión aumenta.

Desde el punto de vista práctico, la corrosión atmosférica es muy importante, puesto que el fenómeno de condensación del vapor de agua se produce fácilmente cuando la temperatura del aire varía entre el día y la noche, por ejemplo. Se intenta en la medida de lo posible proteger los metales cubriéndolos con grasa, pintura o barniz.

3.1.3 Corrosión por corrientes vagabundas

Se les llama así a las corrientes derivadas que pueden existir en las cercanías de un conductor eléctrico enterrado o colocado en agua, deteriorado o mal aislado que van a reunirse con los conductos, cables metálicos, tuberías, etc.

La existencia y la intensidad de estas corrientes dependen del aislamiento de los conductores y también de la resistencia del medio: arena, concreto, tierra, líquido. En algunos casos se ha podido encontrar en vías de tranvía, hasta 4.5 voltios de tensión entre los dos conductores e intensidades de varios amperios.

La parte del conductor donde penetra la corriente constituye el cátodo y la parte por donde sale desempeña el papel de ánodo. La corrosión tiene un carácter electroquímico, es decir, que se produce en las partes anódicas que se disuelven. Puede incluso si la intensidad es suficiente, producirse un desprendimiento de hidrógeno gaseoso sobre las partes catódicas.

Esta corrosión puede ser muy peligrosa, puesto que una corriente de un amperio circulando durante un año, puede disolver 10 kg. de hierro, 11 kg. de cobre y 37 kg. de plomo.

Hemos visto diferentes casos de corrosión en los que ésta tiene un carácter electroquímico, mostrando así que ese tipo de corrosión desempeña en la práctica un papel muy importante. Sin embargo como se indicó al principio de este capítulo que es raro que la corrosión sea imputable a un solo factor, sino más bien a la acción superpuesta de varios factores; químicos, electroquímicos o metálicos.

3.2 Corrosión por lixiviación selectiva

La lixiviación selectiva es un término que se puede utilizar en general para abarcar varias clasificaciones tales como: "descincificación", "desaluminización", etc. El caso del latón ilustra este tipo de falla, se observa que después de exponerlo al agua potable o salada, el latón puede desarrollar capas o tapones de material con la coloración del cobre.

Al examinarlo mostrará que éstas son en realidad regiones esponjosas de baja resistencia de cobre, de las cuales se ha extraído el zinc.-

El mecanismo aceptado generalmente es que el latón se disuelve ligeramente y luego los iones de cobre son desplazados por el zinc que se disuelve y el cobre se deposita. Es evidente que este fenómeno es peligroso cuando los tapones esponjosos de cobre se forman en una tubería de presión, en estos casos, se emplea una aleación de cobre-níquel.

Para evitar el problema, se debe rebajar el contenido de zinc. Las aleaciones más sensibles contienen 40% de zinc y tienen una segunda fase B que agrava el problema. En casos graves, donde las aleaciones de 30% de zinc son molestas, la adición de estaño y arsénico (1% Sn, 0.04% As) o la reducción del zinc por debajo del 20% aliviarán el problema.

En la tubería de hierro fundido gris la matriz de hierro se lixiviará lentamente, dejando detrás el grafito insoluble. Esto se denomina "corrosión grafitica" o a veces en forma inapropiada "grafitización". Por lo general, este es un efecto muy lento y tuberías que muestran esta condición han estado en servicio durante años. Por otro lado, la corrosión grafitica puede ocurrir en pocos años bajo condiciones extremas de los suelos, como cuando se emplean cenizas como relleno.

3.3 Corrosión al nivel del agua por concentración del oxígeno

Este fenómeno se produce cuando una viga metálica de hierro o acero, por ejemplo, hundida en la arena o en la tierra o se sumerge una parte de su altura en agua de mar o en un líquido conductor, teniendo su superficie libre en contacto con la atmósfera. En estas condiciones, el oxígeno tiene más fácilmente acceso a la parte superior de la pieza metálica

El potencial de un electrodo de hierro en contacto con el oxígeno en una solución neutra depende de la concentración en oxígeno. De ello resulta que la parte superior de la pieza metálica se va a comportar como cátodo en relación a la parte inferior, poco accesible al oxígeno. Se forma así un par electroquímico, con circulación de una corriente eléctrica, produciendo una corrosión de la parte anódica.

Es decir, que las partes a las que el oxígeno no tiene acceso están atacadas, mientras que las partes accesibles al oxígeno están protegidas.

De lo anteriormente expuesto encontramos que un tanque que se ha mantenido solo parcialmente lleno con agua se corroerá más rápidamente que uno que esté completamente lleno. La corrosión se produce en el nivel del agua debido al gradiente en la concentración de oxígeno que se desarrolla entre la solución de la superficie del agua y la del fondo. El mayor ataque está justamente debajo del nivel del agua, donde hay una caída pronunciada en la concentración de oxígeno y una distancia corta de recorrido del electrón hasta el nivel del agua, donde se forman los lones de oxidrilo.

3.4 Oxidación

Este tipo de corrosión implica la reacción de los metales con el oxígeno a temperaturas elevadas, usualmente en ausencia de humedad. Merece destacarse que un tipo de formación de óxido, como la herrumbre del hierro, que se produce en presencia de humedad, no se considera perteneciente a esta categoría, puesto que en ella interviene un mecanismo diferente.

La naturaleza del óxido que se forma tiene un papel importante en el proceso de la oxidación:

- a. El óxido puede ser inestable, como en el caso del óxido de oro, y la oxidación no tiene lugar.
- b. El óxido puede ser volátil, como en el caso del óxido de molibdeno y la oxidación se produce a una velocidad constante y relativamente elevada.

- c. Uno o más óxidos pueden formar una capa o capas sobre la superficie metálica. El tercer caso es el más común, por lo que consideraremos diversos aspectos de este tipo de comportamiento.

3.4.1 Películas de óxido

Las capas superficiales de óxido, se llaman películas cuando su espesor es menor de aproximadamente 3000 Å. Cuando su espesor excede este valor y puede medirse con mayor facilidad se denomina cascarilla.

Un ejemplo de la formación de películas durante el tratamiento térmico del acero es la aparición de los colores de revenido durante el calentamiento de los aceros en el intervalo de 232 a 316 grados C.

3.4.2. Formación de cascarilla

Las capas de óxido de mayor espesor, cascarilla, se dividen en dos categorías; protectoras y no protectoras, de acuerdo con la regla de Pilling-Bedworth, un óxido es protector si su volumen es, por lo menos, igual al del metal de que se ha formado. Si el volumen del óxido es menor, la cascarilla no es continua y resulta comparativamente ineficaz para evitar el acceso del oxígeno a la superficie metálica.

Aunque existen muchas excepciones a la regla de Pilling-Bedworth, esta es de utilidad cuando se desconocen las características específicas de la oxidación de un metal. En los metales que tienen estos óxidos no protectores, el peso W de la cascarilla tiende a aumentar en una proporción lineal de acuerdo con la ecuación.

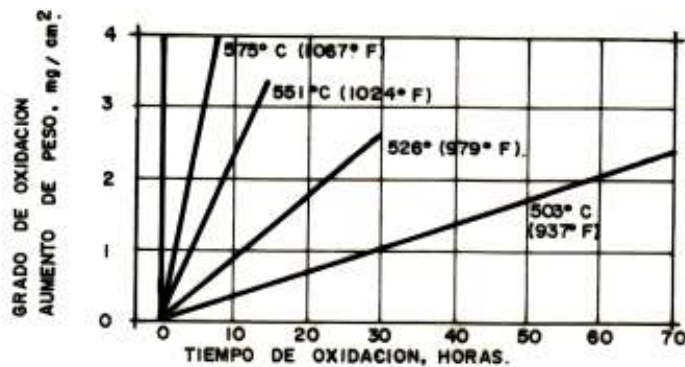
$$W = At \quad (3)$$

Donde A es una constante que depende a la temperatura t= tiempo.

En la figura 9, se muestran los datos correspondientes a la oxidación del magnesio. Algunos de los metales alcalinos y alcalinotérreos se oxidan también de acuerdo con la ecuación (3).

El mecanismo del crecimiento de las películas no protectoras implica, usualmente el paso de oxígeno gaseoso a través de los poros o fisuras de la película de óxido.

Figura 9. Oxidación del Magnesio Puro en Oxígeno



Fuente. Flinn Richard A y Trojan Paul K. **Materiales de ingeniería y sus aplicaciones** pagina 418

Cuando se forma un óxido protector sobre la superficie metálica expuesta, ha de producirse difusión a través de la cascarilla para que tenga lugar el crecimiento posterior.

La oxidación del hierro es un ejemplo de la formación simultánea de dos o más capas de óxido.

A temperaturas elevadas la cascarilla se compone en su mayor parte de FeO que forma una capa interior, el Fe₃O₄ que forma una capa intermedia y el Fe₂O₃ se halla en la superficie en contacto con el oxígeno.

Algunos metales con óxidos protectores tienen velocidades de reacción que disminuyen con el tiempo más rápidamente de lo esperado, por ejemplo, en muchas condiciones, la capa de óxido del aluminio se aproxima a un espesor constante al aumentar el tiempo, obedeciendo así a una ley asintótica.

En otros casos, como el del hierro o del níquel a temperaturas moderadas, se observa un incremento logarítmico del peso del óxido.

$$W = C \log (Dt + E) \quad (4)$$

Donde C, D, y E, son constantes que dependen de la temperatura.

3.4.3 Oxidación Interna

En condiciones especiales, se puede producir la oxidación de un elemento aleante debajo de la superficie del metal base. Esta oxidación interna que puede tener lugar en ausencia de una formación apreciable de películas o de cascarilla en la superficie, requiere, usualmente, las condiciones siguientes:

- a. El elemento de la aleación ha de tener mayor afinidad con el oxígeno que el metal base.
- b. El oxígeno debe difundirse más rápidamente en el metal base que en el elemento de aleación.

- c. La formación de cascarilla sobre el metal base no debe ser tan rápida como para destruir la zona superficial en la que se está produciendo la oxidación interna.

En algunos casos, la oxidación interna es útil como método para endurecer la superficie.

Con más frecuencia, es causa de dificultades por ejemplo, cuando se someten ciertas aleaciones de cobre o plata a tratamientos a elevadas temperaturas en atmósferas suavemente oxidantes. La oxidación interna que se ha producido en estas condiciones puede crear problemas de trabajo o estropear la superficie del metal.

Esta cascarilla interna comparada con las capas de óxidos ordinarios, es difícil de eliminar por medio de los métodos de limpieza usuales.

3.5 Formas de corrosión

Es muy importante en este punto, examinar las formas específicas de corrosión, las características que manifiestan y sus alcances. Siendo la corrosión un fenómeno muy complicado, lo más seguro es que se presenten simultáneamente en el elemento metálico, tanto la corrosión uniforme en toda la superficie como una corrosión localizada por picaduras o ínter granular.

3.5.1 Corrosión uniforme

La superficie del metal es atacada uniformemente con la misma velocidad en todos los puntos.

Los productos de la corrosión se acumulan en ella o se desprenden. La pérdida de peso es también uniforme en toda la superficie. El metal es atacado solamente en su superficie y las partes internas guardan íntegramente sus propiedades.

El término "ataque uniforme" se aplica a cualquier forma de corrosión en la que toda la superficie del metal se corroe en el mismo grado, por tal circunstancia es fácil estimar la vida útil de un material dado y no es de temer una falla inesperada (figura 10).

Figura 10. Corrosión uniforme



Fuente. Viet Loik. **Corrosión e incrustación en tuberías** página 414

3.5.2 Corrosión por picaduras

La corrosión por picaduras, en lugar de una tasa de corrosión total (corrosión uniforme) es la que dicta la escogencia de los materiales. Es poco cómodo poseer un tanque de almacenamiento de gasolina que está 99.9% intacto pero en el cual hay numerosas picaduras que se han formado desde el exterior.

Esta situación molesta puede evitarse al comprender las causas de las picaduras y la certeza de que hay algunas combinaciones bien conocidas de materiales y ambientes que tienen la tendencia a este fenómeno.

Hasta hace poco la formación de una picadura se consideraba simplemente una situación especial de una celda por concentración de oxígeno, pero ello no explicaba la función importante de iones tales como los cloruros.

El concepto más reciente es que una picadura comienza a formarse en una discontinuidad de la superficie tal como una inclusión o marcas de amoladora, una celda por concentración de oxígeno se desarrolla entre la discontinuidad y el material que lo circunda.

El hecho de que involucre los iones de cloruro se debe a que dentro de la incipiente picadura los iones metálicos positivos se disuelven y acumulan, estos atraen los iones cloruro. La concentración de cloruro metálico comienza a formarse en la picadura.

La combinación de iones cloruro e hidrógeno acelera el ataque. Para probar este mecanismo se ha encontrado que el fluido dentro de las grietas expuestas a una solución de cloruro de sodio diluida neutra contiene de 3 a 10 veces más iones cloruro que la solución en bruto y un PH de 4 en lugar de 7.

La corrosión de grietas sigue el mismo mecanismo que la corrosión de picaduras, puesto que la grieta sirve como un hueco ya listo en el cual la concentración es baja.

Para combatir la picadura el aspecto más importante es evitar las combinaciones de materiales y ambientes que se saben que son susceptibles a él. Por ejemplo, muchos de los materiales con superficies pasivas exhiben picaduras debido a la gran diferencia de potencial entre las regiones pasivas y activas del hueco. Además, se sabe que los iones de cloro destruyen localmente las capas pasivas.

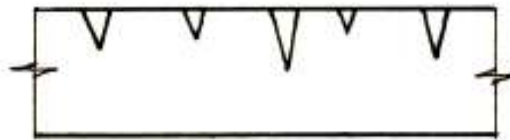
Entre los materiales del tipo inoxidable, desde el más susceptible hasta el menos susceptible, se encuentra la siguiente secuencia para el agua salada.

Acero Inoxidable tipo 304 (18% Cr, 8% Ni)

Acero Inoxidable tipo 316 (18% Cr, 8% Ni, 2% Mo)

Titanio

Figura 11. Corrosión por picaduras



Fuente. Viet Loik. **Corrosión e incrustación en tuberías pagina 414**

3.5.3. Corrosión intergranular

Al igual que la corrosión por picaduras, es también una corrosión localizada, pero en este caso la estructura del metal desempeña un papel, puesto que la corrosión progresa siguiendo los contornos de los cristales del metal.

La corrosión inter granular tiene lugar cuando existe una pronunciada diferencia de reactividad entre los límites de grano y el resto de la aleación.

Esta diferencia se establece en el acero inoxidable, cuando se forman carburos de cromo en los límites de grano durante el calentamiento del acero en el intervalo de los 482-760 °C.

De este modo, la región de los límites de grano se empobrece en cromo y se torna anódica con respecto a las regiones circundantes.

Entonces, puede producirse la corrosión a lo largo de los límites de grano y dar origen a serios desperfectos.

Figura 12. Corrosión intergranular



Fuente. Viet Loik. **Corrosión e incrustación en tuberías** página 414

4. CONTROL DE LA CORROSIÓN

Uno de los problemas principales que se presentan en la práctica, desde el punto de vista de la ingeniería, es la protección del hierro en cualquiera de sus formas, sea estructural, placas o tuberías.

El hierro interviene en la construcción de edificios, puentes, equipos industriales, tuberías, reuniendo desde este punto de vista dos condiciones muy importantes que son: bajo costo y elevada resistencia. A ello se agrega el hecho de que se le puede obtener en las formas más variadas de características diversas.

Pero en oposición a dichas ventajas nos encontramos con que el hierro es uno de los metales más fácilmente atacables. Dicho ataque, que puede iniciarse por simple exposición a los agentes atmosféricos, se acelera notablemente en presencia de reactivos químicos de naturaleza variada (oxígeno, agua, ácidos, sales, álcalis, etc.).

De acuerdo con su posición en la tabla electromotriz (Tablall), o de tensiones electroquímicas, el hierro se encuentra entre los metales que tienen cierta tendencia a pasar al estado iónico, es decir a oxidarse. Este fenómeno de ionización involucra la formación de sustancias más o menos solubles, que reciben las denominaciones de herrumbre, óxido, etc.

Los productos de la corrosión del hierro consisten en hidrógeno ferroso, hidróxido férrico, óxido ferroso, óxido férrico, etc., los productos que se forman están condicionados a la naturaleza del medio en que se produce la corrosión.

Muchas son las formas de evitar o por lo menos retardar los fenómenos de corrosión. El procedimiento a elegir depende de las características, dimensiones y aplicaciones del objeto a proteger.

Así puede comenzarse desde el punto de vista metalúrgico, por efectuar aleaciones con otros metales, de tal manera de aumentar la resistencia a la corrosión, por ejemplo: los diversos tipos de aceros inoxidables o recubrimientos con películas metálicas (hierro galvanizado).

El término Control de la Corrosión, usado en su sentido más amplio es la regulación de una reacción de corrosión para obtener un objetivo específico.

La regulación de la reacción de corrosión, tiene por objeto en la mayoría de los casos, conservar las propiedades físicas y mecánicas de éstos metales y en algunos casos particulares, la principal función del control de la corrosión será provenir la contaminación del producto o productos almacenados, por ejemplo en los tanques que contienen productos alimenticios.

Como la corrosión es la reacción de un metal con su medio ambiente, el control se puede efectuar, ya sea en el metal, la interfase o en el propio medio ambiente, la selección de metales o aleaciones preferentemente a otros o aún la selección de materiales no-metálicos debe entenderse como un control de la corrosión en su sentido más amplio.

El control de la corrosión no se refiere únicamente a la relación metal-ambiente; hay otros factores que hay que tomar en cuenta: propiedades mecánicas y físicas, costos de materiales, tiempo de fabricación, vida deseada del equipo o estructura, etc.

En la mayoría de los casos el criterio técnico-económico es el factor determinante y por esta razón se escogen generalmente materiales menos resistentes pero más económicos y el control se hace por medios indirectos, como por ejemplo: por protección catódica, anódica, aplicación de recubrimientos metálicos y no metálicos, inhibidores, etc.

4.1 Diseños anticorrosión

Existen varios principios referentes al diseño, fundados en la naturaleza electroquímica de los procesos de corrosión que merecen atención especial en el control de la corrosión

Aún cuando la elección de materiales resistentes a la corrosión o el empleo de tratamientos que la demoren, forman también parte de la operación completa de diseñar, se estudia en este párrafo un aspecto diferente del diseño.

Se trata del problema de asegurar que, cualquiera que sea la velocidad a la que se produzca el ataque corrosivo, éste tenga lugar de una forma tan uniforme como sea posible y no cause fallas prematuras como resultado de una intensa corrosión localizada.

El principio de diseño más importante a éste respecto consiste con mucho en evitar el contacto entre metales diferentes, en presencia de una solución corrosiva.

Se recordará que la corrosión se localiza entonces en el metal electroquímicamente más activo quedando sustancialmente protegido el otro metal.

Con frecuencia la corrosión se localiza más ampliamente en las proximidades de la unión entre metales diferentes. Un ejemplo extremo de diseño incorrecto, desde este punto de vista, es el empleo de una pequeña pieza fabricada con un metal anódico (activo), montada en otra, de mayor extensión, de metal catódico, por ejemplo un tubo de acero en un tanque de cobre.

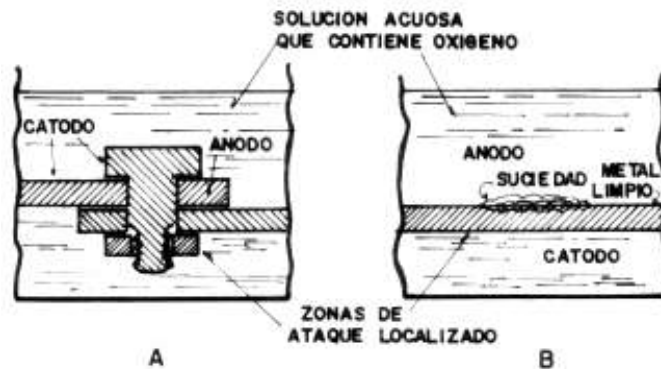
La gran zona catódica origina una corriente de corrosión grande, que se localiza en el hierro y produce el deterioro rápido y finalmente, la falla. Está claro que un tubo de cobre en un estanque de acero ofrece mucho menos peligro, aunque aún así, puede ser un problema el ataque localizado.

Un diseño mucho más perfecto, desde luego, haría uso del mismo metal para el tubo y para el estanque. Siempre que sea inevitable la unión directa de metales diferentes, un aislamiento que impida el contacto eléctrico entre ellos evitará, frecuentemente, la intensificación de la corrosión.

Un buen diseño puede contribuir a evitar la aparición de heterogeneidades en el metal y en el medio corrosivo. Estas heterogeneidades son causas potenciales de corrosión localizada.

Deben evitarse las hendiduras, los tornillos y remaches (véase figura13) y deben ser sustituidos preferentemente por soldaduras de tope o impedir el acceso a ellas del agente corrosivo, perfeccionando los ajustes, rellenando las grietas de un material impenetrable o pintado las piezas que han de estar en contacto antes del montaje. Así mismo es conveniente que el diseño permita la limpieza adecuada de las piezas críticas del equipo para evitar la corrosión localizada.

Figura 13. Zona de Ataque Localizada por Mal Ajuste y Suciedad



Fuente. Guy Albert g. **Metalurgia física para Ingenieros pagina 334**

También debe tenerse en cuenta al efectuar el diseño, el flujo uniforme del líquido corrosivo puesto que las zonas de estancamiento, por una parte, y las condiciones de choque por otra, pueden producir corrosión acelerada.

Cuando se asignen tensiones de trabajo a piezas de maquinaria que deban funcionar en un medio corrosivo, ha de tenerse en cuenta la posible aparición de fatiga por corrosión o corrosión bajo tensión.

En estudios realizados de la fatiga por corrosión se ha podido apreciar que un metal con una resistencia adecuada a la corrosión proporciona un resultado satisfactorio, pero que generalmente, es conveniente utilizar una tensión de trabajo moderada cuando intervienen condiciones de fatiga.

La corrosión bajo tensión se produce en condiciones estáticas que corresponden a una combinación específica de metal y de agente corrosivo.

Se han considerado los ejemplos acero/solución de hidróxido sódico y latón/solución de amoníaco.

Otras combinaciones importantes son: acero inoxidable austenítico/solución de cloruro, aceros aleados templados/solución de sulfuro de hidrógeno y aleaciones de aluminio/solución de cloruro.

Evidentemente es mejor evitar el empleo de estas peligrosas combinaciones, pero en caso de necesidad por medio de tratamientos adecuados de eliminación de las tensiones de la aleación o la modificación del medio corrosivo, se puede lograr un control adecuado de la corrosión.

4.2 Mejora de las características del metal

La resistencia a la corrosión de un metal determinado puede mejorarse aumentando su pureza, pero, con frecuencia, la baja resistencia mecánica de los metales puros es una desventaja. Es más corriente aumentar simultáneamente la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión, utilizando los elementos de aleación apropiados.

En casi todos los metales pueden hallarse ejemplos de tales procesos de aleación, pero son especialmente significativas las aleaciones a base de hierro a causa del amplio uso de los aceros inoxidables.

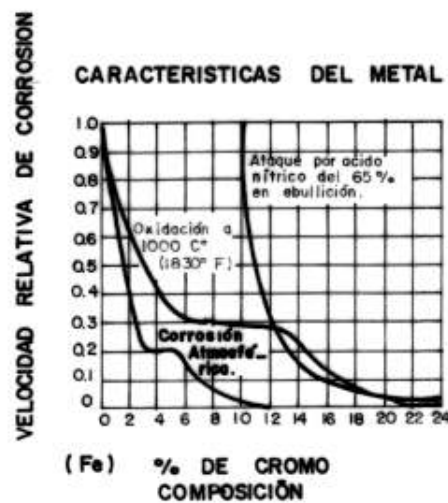
Muchos aleantes son útiles para proporcionar al hierro una resistencia a la corrosión limitada.

Por ejemplo, pequeñas cantidades, de fósforo y de cobre mejoran la resistencia a la corrosión atmosférica de los aceros estructurales, los contenidos elevados de silicio son adecuados para las aleaciones de fundición resistentes al ataque de los ácidos.

Aproximadamente un 10% de aluminio proporciona al hierro una gran resistencia a la oxidación a temperaturas elevadas, aunque también lo hace más frágil, sin embargo, el cromo hace aparecer como enana la importancia de los demás elementos de aleación.

Aunque existen muchas razones para ello, la más importante es que el cromo hace aumentar la resistencia a la corrosión en casi todos los ambientes, la figura 14 muestra la relación existente entre el contenido de cromo y las velocidades de corrosión, en tres condiciones diferentes.

Figura 14.- Efecto del cromo sobre la disminución de la velocidad de corrosión en las aleaciones con base de hierro.



Fuente. Guy Albert g. **Metalurgia física para Ingenieros pagina 334**

En la siguiente tabla V, se describen varios metales y aleaciones y su resistencia relativa a la corrosión, la cual nos da cierto índice comparativo de cual o cuales características deben reunir ciertos metales para usarlos con diferente grado de éxito en distintos ambiente corrosivos.

Tabla V. Resistencia relativa a la corrosión de varios metales y aleaciones

RESISTENCIA RELATIVA A LA CORROSIÓN DE VARIOS METALES Y ALEACIONES

| Ambiente corrosivo | Atmósfera | | Agua | | | Gases a temperatura elevada | | | | Producto ab- men- ticio | Soluciones ácidas al 5-15% | | | Soluciones alcalinas al 1-20% | Soluciones salinas (concentraciones moderadas) | |
|--|------------------|----------------------|---------------------|-----------|----------------------|-----------------------------|------|--------------------------------------|------|-------------------------------|----------------------------|--------------------------------|---------|-------------------------------|--|-------------------|
| | Ma- ri- na | In- dus- trial | Do- més- tica | De mar | Vapor húme- do | Gases oxí- dantes | | Gas reduc- tor del combustible | | | HCl | H ₂ SO ₄ | Acético | | NH ₄ Cl | MgSO ₄ |
| | | | | | | Temperatura de seguridad | | | | | | | | | | |
| | | | | | | *F | *C | *F | *C | | | | | | | |
| Hierro forjado | M | M | R | R | RB | | | | | M | M | M | B | M | RB | |
| Acero bajo en carbono | M | M | R | R | RB | 1000 | 538 | 1000 | 538 | M | M | M | B | M | RB | |
| Acero estructural de baja aleación y alta resistencia mecánica | R | R | R | R | RB | | | | | M | M | M | E | M | RB | |
| Acero galvanizado | B | B | RB | RB | RB | | | | | M | M | M | M | M | RB | |
| Fundición gris | R | RB* | B | R | R | | | | | M | M | M | B | M | RB | |
| Fundición de hierro con 3,5% de Ni | RB | RB | R | RB | R | 1200 | 649 | 1200 | 649 | M | M | M | BE | M | RB | |
| Hierro con 17% de Cr | B | B | B | MB | B | 1550 | 843 | 1550 | 843 | BE | M | M | E* | B | RB | |
| Acero inoxidable 18% Cr-8% Ni | E | B | E | RB | E | 1650 | 899 | 1650 | 899 | E | M | MB | E | E | B | |
| Acero inoxidable 25% Cr-20% Ni | E | B | E | B | E | 2100 | 1149 | 2000 | 1093 | | M | R | E | E | B | |
| Níquel (99,2%) | E | B | E | RE | E | 1900 | 1037 | 2300 | 1200 | BE | RB | RB | RB | E | B | |
| Inconel (80% Ni, 24% Cr, 6% Fe) | E | B | E | RE | E | 2000 | 1093 | 2100 | 1149 | E | R | R | B | E | B | |
| Hastelloy C (58% Ni, 17% Mo, 14% Cr, 5% W, 6% Fe) | E | E | E | E | E | 2100 | 1149 | 2100 | 1149 | E | B | E | E | E | E | |
| Cobre (99,9%) | B | B | B | B | B | | | | | RB | MB | RB | RB | B | RB | |
| Bronce con 5% de estaño | B | RB | B | B | B | | | | | R | M | RB | RB | B | RB | |
| Aluminio (99,2%) | BE | E | RB | B | B | 800 | 427 | 800 | 427 | B | M | R | B | M | R | |
| Aleación de aluminio 2024T6 (4,5% Cu, 1,5% Mg, 0,6% Mn) | MB | RB | MR | M | R | M | | M | | R | M | M | R | M | M | |
| Magnesio | B | B | R | M | M | | | 400 | 204 | ME | M | M | M | E | M | |
| Aleaciones de forja de magnesio | B | B | R | R | M | | | 400 | 204 | ME | M | M | M | E | M | |
| Estaño | B | B | E | B | B | | | | | B | M | M | M | R | RB | |
| Plomo (99,9%) | B | B | MB | B | B | | | | | M | R | E | M | M | B | |

* La temperatura de servicio es siempre una variable importante y, en este caso, la estimación corresponde sólo a temperaturas inferiores a 49°C (120°F).
E = Excelente B = Buena R = Regular M = Mala

Fuente. Guy Albert g. **Metalurgia física para Ingenieros** pagina 346

4.3 Recubrimientos protectores no metálicos

4.3.1 Recubrimientos interiores

Generalmente están expuestos en forma continua al medio corrosivo y a variaciones de exposición, ya sea de cambios de temperatura o de agentes corrosivos; por supuesto que estas condiciones son previsible, lo que permite escoger adecuadamente el tipo de recubrimiento requerido.

4.3.2 Recubrimientos exteriores

Los recubrimientos exteriores trabajan generalmente en condiciones variables, aunque no tan severas si se les compara con los recubrimientos interiores. Se usan para proteger contra: condiciones atmosféricas, vapores corrosivos y algunos casos de derrames y salpicaduras de sustancias corrosivas.

Muchos recubrimientos formulados para trabajar como recubrimientos internos, pueden trabajar perfectamente en el exterior de los equipos, algunas veces en espesores menores que los especificados para el interior, si las condiciones son favorables.

4.3.3. Espesor de los recubrimiento

Esta división es más bien objetiva y práctica, considera a los recubrimientos gruesos con espesores de 15 milésimas de pulgada (380 micras) en adelante los recubrimientos delgados con espesores de 5 a 15 milésimas de pulgada (127 - 380 micras).

En el primer grupo están incluidos los recubrimientos internos, ya sea que su aplicación se haga en forma líquida o laminada.

En el segundo grupo están considerados algunos recubrimientos internos que no requieren de espesores gruesos para dar la protección buscada; también están considerados entre ellos el gran grupo de recubrimientos externos, inclusive para exposiciones atmosféricas.

Comenzaremos por recubrimientos orgánicos gruesos, o sea, los comprendidos en espesores de 15 milésimas de pulgada (380 micras) o mayores.

4.3.4. Recubrimientos orgánicos gruesos

4.3.4.1 Recubrimientos laminados

En el grupo de recubrimientos laminados están comprendidos los hules o elastómeros, nos limitaremos a indicar que el hule duro, hule suave, policloropeno, butilo, nitrilo, así como el cloruro de polivinilo plastificado pueden ser aplicados en forma de láminas sobre superficies de hierro y utilizando adhesivos adecuados para lograr una verdadera unidad entre ellos y el substrato. Su espesor varía de 125 milésimas de pulgada (1/8"), hasta 500 milésimas (1/2"). Excepto el cloruro de polivinilo, el resto requieren de vulcanización con vapor.

4.3.4.2 Recubrimientos líquidos

En el grupo de los recubrimientos líquidos pueden considerarse los recubrimientos bituminosos, poliéster, epóxicos, cloruro de polivinilo, plastisol, que pueden ser aplicados solos o con refuerzos de filamentos largos o cortos, telas de fibra de vidrio o papel y pigmentos inertes.

Los recubrimientos bituminosos como el alquitrán de hulla o algunos tipos asfálticos se aplican como líquidos calientes previa fusión de su estado sólido.

Los esmaltes de alquitrán de hulla aplicados en caliente son probablemente los más viejos y mejor conocidos de los recubrimientos resistentes al agua.

Los espesores de los recubrimientos de 1/16 a 3/16 de pulgada, combinando su grueso espesor con su baja transmisión de vapor,

4.3.4.3. Recubrimientos sólidos

Y por último el grupo que incluye a todos aquellos recubrimientos sólidos que se aplican por plastificación o por fluidización. La plastificación consiste en la aplicación de un plástico sólido fundiéndolo en el momento de ser aplicado y proyectándolo hacia la superficie metálica a recubrir.

Generalmente se usan alambres o varillas estruídas de plástico, o polvos muy finos que alimentan la pistola fundente y proyectora. La superficie debe limpiarse previamente con chorro de arena a metal blanco. Con este sistema pueden aplicarse materiales como: polietileno, poliestireno, acetato de polivinilo, poliamidas, cauchos naturales, epóxicos, melamina, fenólicos, politetrafluoretileno.

La fluidización o lecho fluidizado es un sistema de aplicación de plásticos finalmente divididos en forma de polvos, sobre piezas metálicas precalentadas. Los plásticos más usados para esta aplicación son: poliamidas, polietileno, poliestireno, poliéster clorado, politetrafluoretileno, epoxies, acetato de polivinilo y cloruro de polivinilo.

4.3.5. Recubrimientos orgánicos delgados

Comprende el grupo más numeroso de recubrimientos con espesores de 5 a 15 milésimas de pulgada (127 a 380 micras).

Dentro del grupo de recubrimientos anticorrosivos a que nos hemos estado refiriendo, los recubrimientos delgados se utilizan ventajosamente en diversas áreas particulares de las plantas industriales. En virtud de su versatilidad y eficacia han tenido una mayor difusión y han encontrado una gran aceptación en su uso.

Al referirnos a recubrimientos delgados, nos estamos refiriendo a los recubrimientos protectores derivados de las pinturas.

Un recubrimiento controla principalmente la corrosión frente al medio corrosivo, sin embargo esto no es tan sencillo como pudiera creerse. Teniendo en cuenta el mecanismo de la corrosión, puede verse que una pintura protectora eficaz debe llenar ciertos requisitos.

1. Resistir el ambiente exterior a que está sujeto.
2. Evitar el paso de la humedad, agua, vapor de agua.
3. Evitar el paso de los iones.
4. Evitar el paso de oxígeno
5. Adherirse a las superficies firmemente.

No existe actualmente un recubrimiento delgado que satisfaga plenamente estos requisitos, pero hay una gran variedad de recubrimientos, y cuando se presenta un serio problema de corrosión, es muy importante escoger el tipo más apropiado.

Los humos y vapores ácidos, la humedad y las sales presentes en el aire aumentan grandemente la rapidez de la corrosión.

En tales ambientes, se exige mucho de una película relativamente delgada, sin embargo, un recubrimiento apropiado aplicado debidamente, puede servir de barrera eficaz y evitará la corrosión durante un período largo.

Se puede disponer en la actualidad de pinturas que sí resisten casi todas las sustancias químicas y condiciones o ambientes corrosivos. Estas pinturas protectoras, son valiosos materiales para la ingeniería y se distinguen de las pinturas para fines solo decorativos, de aquí que se les llame recubrimientos protectores para diferenciarlos.

Actualmente hay centenares de tipos de recubrimientos protectores y muchas variedades de cada tipo; sin embargo, todas tienen una propiedad común; se aplican en estado líquido y forman películas sólidas y continuas, después de aplicadas a las superficies.

Tienen diversos grados de viscosidad o fluidez y existen variados medios de convertirlos de una película húmeda a una completamente seca y sólida.

Algunos recubrimientos son catalizados o curados, otros horneados, algunos secan rápidamente, otros con lentitud y hay algunos que nunca endurecen completamente, sin embargo, todo recubrimiento debe tener un ingrediente esencial capaz de formar una película continua sobre la superficie cubierta. Este ingrediente esencial recibe comúnmente el nombre de aglutinante.

Es generalmente de naturaleza resinosa y tienen la propiedad no solo de formar una película con cierta adherencia, sino de retener también pequeñas partículas de sustancias minerales o de pigmentos.

Así pues, un recubrimiento protector tiene dos componentes fundamentales, el aglutinante y el pigmento. Estos pueden estar constituidos a su vez por otros componentes individuales.

El aglutinante que debe hallarse en estado líquido al aplicar el recubrimiento se llama, por lo común en esta fase, vehículo.

El vehículo líquido puede convertirse en el aglutinante sólido por diversos métodos. La primera posibilidad es simplemente disolver el aglutinante en solventes volátiles, los cuales se evaporarán después de aplicado el recubrimiento y depositarán el aglutinante en estado sólido.

El material volátil contenido en el vehículo se conoce con el nombre de disolvente o adelgazador.

Teniendo presente estos componentes esenciales de los recubrimientos protectores puede verse que es posible clasificarlos con el tipo clase de resina aglutinante en que se basan.

4.3.5.1 Alquidáticos

Los alquidáticos son las resinas que se usaron en los primeros "esmaltes sintéticos". Durante los últimos cuarenta años, más o menos, han desplazado grandemente a las tradicionales pinturas de aceite en usos de conservación o mantenimiento industrial debido a su mayor rapidez de secado, dureza, mejor retención del brillo y mayor resistencia al agua.

Los alquidálicos tienen buena resistencia a la humedad o al agua, con intermitencia, como es la lluvia, y protegen bien contra los efectos corrosivos de las sales neutras. Su resistencia a los álcalis o cáusticos es pobre, los ácidos diluidos tienen menos efectos sobre la película que los álcalis diluidos.

Su poca resistencia a los ácidos diluidos se debe no tanto a las fallas en la película sino más bien a la penetración de la misma y ataque a la superficie metálica.

Su resistencia a los disolventes derivados del petróleo y a los aceites es regular. Las películas se reblandecen por los solventes fuertes, tales como los alcoholes y los hidrocarburos aromáticos y se disuelven rápidamente con las cetonas, ésteres y solventes clorados.

4.3.5.2 Hule clorado

Los recubrimientos de este tipo tienen como base resinas que se obtienen por cloración del hule natural. Se dispone de dos tipos principales. Una de ellas es una solución de resina de hule clorado plastificado con plastificantes clorados, y la otra es una mezcla de hule clorado con resinas alquidálicas u otros plastificantes saponificables.

Su resistencia a los ácidos y álcalis puede calificarse entre regulares y excelentes dependiendo del plastificante. Como secan por evaporación del solvente, pueden volver a disolverse en los mismos solventes. Su resistencia a los aceites, derivados del petróleo, solventes y alcoholes es regular. Estas pinturas se disuelven en los hidrocarburos aromáticos, ésteres y cetonas. El hule clorado se ablanda y plastifica por aceites y grasas vegetales.

4.3.5.3. Polietileno clorosulfonado

Los recubrimientos de polietileno clorosulfonado resisten a los agentes oxidantes fuertes tales como el ozono o hipocloritos.

Conservan su flexibilidad por un período indefinido, aún a temperaturas bajo cero. Poseen buena resistencia al calor y la humedad.

A la fecha, su uso ha sido limitado a condiciones específicas, como en aplicaciones para resistir salpicaduras directas de materiales oxidantes.

4.3.5.4. Uretanos

Hay tres tipos distintos de poliuretanos que son los más importantes:

- 1) De un solo componente de tipo de horneado. Hecho de isocianatos y resinas poliéster, poliéter o epóxicas.
- 2) Los recubrimientos de dos componentes hechos con aductos poliisocianatos reactivos a temperatura ambiente y otros materiales de contenidos hidroxílicos como los mencionados antes.
- 3) Un recubrimiento de un solo componente que contiene aductos poliisocianato de bajo peso molecular que reacciona con agua después de la evaporación del solvente con propiedades esencialmente iguales a los otros tipos de poliuretanos.

La resistencia de los tipos de secados al aire y horneados son muy similares, teniendo estos últimos una resistencia ligeramente superior.

Las propiedades más significativas de los uretanos son:

- a. Resistencia a más solventes en comparación con otros recubrimientos secados al aire.
- b. Resistencia a la abrasión
- c. Tenacidad. La resistencia al impacto es también excelente.

En exposiciones a la intemperie, los colores claros se amarillean. Pierden algo de su adherencia en exposiciones prolongadas al agua.

El recubrimiento de un solo componente clasificados como del tercer tipo de uretanos y mencionado antes no puede ser pigmentado. Los uretanos también tienen una tendencia a laminarse entre capas o entre nuevas y viejas aplicaciones.

4.3.5.5. Silicones

Los recubrimientos de silicón resisten temperaturas elevadas, se utilizan para chimeneas, hogares y aplicaciones similares.

Los recubrimientos pueden obtenerse solamente en colores aluminio y negro. Los silicones para alta temperatura no son muy notables por su resistencia química.

4.3.5.6 Epóxicos

Podemos considerar cuatro tipos de recubrimiento epóxicos: Epóxico-fenólico de horneado, epóxico curado con anímidas, epóxico curado con poliamidas y epóxico esterificado. Los últimos tres tipos curan a temperatura ambiente.

Las combinaciones de resinas epoxicas y fenólicas tienen la mayor resistencia química de todas sin embargo tampoco soportan a los agentes oxidantes como ácido nítrico, ácido crómico, hipocloritos o materiales similares.

Pueden comportarse muy bien en la mayoría de los solventes y en muchos hidrocarburos clorados.

Este tipo de recubrimiento tiene excelente resistencia a la sosa cáustica concentrada y otros álcalis a altas temperaturas.

Los epoxicos curados con Aminas y poliamidas no son tan resistentes como lo son los epóxico-fenólicos, pero son muy usados como recubrimientos para mantenimiento.

A pesar de que muchos de sus propiedades son similares, los tipos curados con aminas son más resistentes a los ácidos y solventes, mientras que las poliamidas dan superior resistencia a los álcalis y al agua.

Las propiedades de los recubrimientos epoxicos esterificados dependen grandemente del tipo de aceite secante usado para esterificación. Su resistencia química es inferior a los epóxicos catalizados pero son superiores a los esmaltes alquidálicos convencionales en este aspecto.

Una desventaja que es característica de todos los epóxicos es su tendencia a calentar en exposiciones a la luz solar. Formulaciones apropiadas ayudan a reducir este caleo. Un recubrimiento epóxico esterificado bien formulado puede resistir a la erosión debida al caleo, mejor que los tipos catalizados.

Para muchas exposiciones esta tendencia al caleo no es particularmente importante, pero los usuarios nuevos de este recubrimiento deberán darse cuenta de que el brillo inicial desaparecerá muy pronto en exposiciones a la luz solar.

4.3.5.7 Epóxicos- Alquitrán de hulla

La combinación de las resinas epóxicas y alquitrán de hulla suman las mejores propiedades de ambos materiales. Se usa un agente de curado y como resultado se obtiene una película muy insoluble, tenaz, dura y resistente químicamente.

Los recubrimientos epóxicos - alquitrán de hulla han tenido mucho éxito en la protección del fondo de tanques de gasolina y en el almacenamiento de petróleos crudos, tanques de agua dulce y de mar y otros tipos de estructuras.

4.3.5.8. Vinílicos

Los recubrimientos vinílicos producen una película homogénea y casi impermeable, además de excelente tenacidad y resistencia química. La película tiende a excluir los iones y el oxígeno de las superficies sobre las que se aplica. Son inertes a casi todos los ácidos inorgánicos, sales álcalis, así como el agua, hidrocarburos alifáticos, alcoholes y materiales similares.

Los recubrimientos vinílicos son similares a las lacas en cuanto a que la película es formada por la sola evaporación de solventes. Generalmente secan al tacto después de cinco minutos de su aplicación. Su resistencia al agua es excelente.

Hay muchos tanques de agua dulce recubiertos interiormente con vinílicos que están en perfectas condiciones después de 20 o más años de servicio.

La resistencia a la intemperie de los vinílicos bien formulados es extraordinaria.

Estos recubrimientos virtualmente no señalan cambio en la apariencia, aún en exposiciones de más de diez años. Ningún otro recubrimiento práctico para uso de mantenimiento, puede igualar esta cualidad.

Las desventajas de los vinílicos prácticamente están asociadas a la aplicación, deben aplicarse sobre superficies debidamente preparadas e imprimadas.

Aún cuando su secamiento rápido es una ventaja, por muchos aspectos los pintores que están acostumbrados a aplicar pinturas convencionales deben ser instruidas para asegurarse de que el material llegue a formar una película húmeda.

Generalmente los recubrimientos vinílicos tienen muy bajo contenido de sólidos, de ahí que deban aplicarse a tres a cuatro capas para obtener un espesor de película de cinco milésimas de pulgada.

Recientemente se han desarrollado los descubrimientos vinílicos de altos sólidos que pueden aplicarse en solo dos capas para alcanzar cinco milésimas de pulgada de espesor.

4.3.6 Recubrimientos inorgánicos

Además de los recubrimientos orgánicos que acabamos de mencionar, existen los recubrimientos minerales o inorgánicos tales como el vidrio que es comúnmente usado para depósitos de ácido y así evitar la corrosión extrema.

Los tipos de vidrios más utilizados son el de gran contenido de sílice y el vidrio de boro silicato.

Los recubrimientos de esmalte cerámicos o vidriado, percelanizados, o peltres son básicamente similares a los recubrimientos de vidrio su principal diferencia consiste en la aplicación sobre metales más delgados a espesores también más delgados, generalmente cuatro milésimas en una sola capa, o de ocho a diez milésimas para dos capas.

Su uso principal está destinado a la corrosión atmosférica a humos y vapores químicos con excepción del ácido fluorhídrico.

También podemos mencionar los inorgánicos de silicato de zinc usados ampliamente en la protección del acero en condiciones de humedad, salinidad e intemperismo severos, además es muy resistente a la mayoría de disolventes, su adherencia es excelente, puede aplicarse fácilmente con pistola de aire y en superficies limpias ya que su contaminación con productos orgánicos impide su adherencia. Proporciona protección galvánica a las áreas rayadas o desgastadas por su alto contenido de zinc.

En plantas de productos químicos son muy usados como primarios permanentes en combinación con acabados orgánicos resistentes a productos químicos ácidos o alcalino, como los recubrimientos epóxicos vinílicos.

4.4 Recubrimientos protectores metálicos

4.4.1. Preparación de las superficies

El requisito más importante en la tecnología de los recubrimientos protectores es la limpieza de la superficie a la que éstos se aplican.

La naturaleza química y física de una superficie metálica ejerce un efecto muy marcado sobre la calidad de cualquier recubrimiento, ya sea de tipo metálico orgánico o inorgánico que pueda emplearse para protegerla. La presencia de grasa, aceite, productos de la corrosión, suciedad o de otros cuerpos extraños ejerce una determinada influencia sobre la adherencia, continuidad y duración de los recubrimientos.

Antes de proceder a la aplicación del recubrimiento a las superficies limpias, éstas pueden someterse a dos tipos tratamiento superficial. Las superficies que se van a plaquear pueden atacarse, tratarse, con chorro abrasivo, pulirse o bruñirse, bien para garantizar la adhesión del recubrimiento, bien para alcanzar las características visuales adecuadas.

Las superficies que se recubrieren con pintura pueden tratarse con soluciones de fosfato o cromato, u oxidarse electrolíticamente para obtener películas superficiales inertes y resistentes a la corrosión que mejoran la adherencia de recubrimiento.

Existe una gran variedad de métodos de limpieza, y su selección para un determinado trabajo está condicionada en gran parte al carácter y al volumen del trabajo concreto, al tipo (metálico u orgánico) de los recubrimientos que se van a emplear y, en general, a las condiciones económicas.

4.4.1.1. Desengrasado

El principal tipo de contaminación superficial está representado por aceites y grasa lubricantes mezclados con hollín o con suciedad.

Las sustancias oleosas pueden dividirse en 2 tipos principales

- a. grasas animales y vegetales
- b. aceites minerales.

Las primeras pueden separarse con álcalis fuertes, mientras que los últimos se eliminan eficazmente recurriendo a la emulsión con jabones y sustitutos de éstos.

Por regla general, las composiciones más alcalinas se emplean en la limpieza del acero, mientras que las moderadamente alcalinas, se emplean en la del aluminio y de las piezas fundidas por inyección de base de zinc y de base de aluminio.

Con el objeto de que el agente actúe eficazmente en la limpieza de la superficie, suele ser costumbre emplear mezclas de distintos compuestos alcalinos.

A continuación, examinaremos brevemente las características principales de estos constituyentes.

Sosa cáustica:

Este compuesto, que es el más fuerte de los del tipo alcalino.

Se emplea extensamente tanto debido a su elevada alcalinidad, como el hecho de que se considera de gran utilidad para la saponificación de aceites y grasas de origen animal y vegetal. Es un agente humectante pobre y difícil de arrastrar por lavado con agua.

Carbonato sódico

El carbonato sódico es un compuesto alcalino moderado y barato que se emplea en casi todos los agentes de limpieza de metales. Sirve de ayuda en las emulsiones de aceites producidas por el jabón y es un detergente muy conveniente.

Fosfatos

El ortofosfato sódico es uno de los componentes más corrientes empleados en los limpiadores de metales. Tiene un poder humectante y una acción emulsionante bastante buena, contribuye a la acción del jabón y se arrastra muy bien por lavado con agua.

Silicatos alcalinos

Estos son excelentes agentes de desfloculación , y poseen buenas propiedades humectantes, emulsionantes y de arrastre por lavado con agua.

Jabón y Detergentes sintéticos

El jabón, que es una mezcla de sales alcalinas de ácidos grasos superiores, es el más antiguo detergente conocido y hasta hace poco tiempo fue desplazado por los detergentes sintéticos.

Los detergentes sintéticos abarcan una variedad de hidrocarburos alifáticos y aromáticos sulfonados.

Tanto éstos, como el jabón, disminuyen la tensión superficial y la tensión interfase frente al aceite y, por consiguiente, son unos excelentes agentes emulsionantes. Los jabones alcanzan su eficacia máxima en la zona de Ph comprendida entre 9 y 11.

4.4.1.2. Descascarillado

La cascarilla de óxido y los productos de la corrosión se desprenden de los metales, bien mediante el decapado ácido, bien recurriendo a la abrasión mecánica de la superficie.

El espesor y la composición de la cascarilla dependen de los antecedentes térmicos experimentados por el metal.

El decapado químico se basa en la inmersión del metal en ácido diluido hasta que la cascarilla se haya desprendido o disuelto, en la práctica corriente se utiliza ácido sulfúrico de 5 a 10 por ciento, a unos 65 u 88 grados centígrados, empleando un inhibidor catódico para disminuir el ataque del metal y la fragilización el acero por el hidrógeno.

Hasta un cierto limite también se emplea ácido clorhídrico de aproximadamente la misma concentración pero a temperaturas algo más bajas, en cualquiera de estos dos casos el tiempo que exige el descascarillado oscila entre 5 y 20 minutos según el tipo de cascarilla.

Los métodos de abrasión mecánica de descascarillado incluyen la aplicación de chorro de abrasivo, el frotamiento con cepillo de alambre, el gratado y el pulimentado.

Por regla general estos métodos dan lugar a un mayor derroche de metal y producen superficies algo más bastas que las que se consiguen con los de decapado, sin embargo, el tratamiento con chorro de arena constituye desde hace mucho tiempo el método preferido para la separación del óxido y de la cascarilla, ya que da lugar a la obtención de superficies a las que los recubrimientos se adhieren satisfactoriamente. En los últimos años la arena se ha reemplazado progresivamente, y en gran parte por granalla de acero y por perdigones.

Otros métodos mecánicos de descascarillado incluyen el empleo de martillos neumáticos, de cortafríos, de rasquetas etc. Estos procesos suelen ir seguidos de un tratamiento con cepillo de alambre.

La limpieza a la llama de la cascarilla de las superficies extensas, consiste en aplicar una llama de calor muy intenso a las superficies que se desean descascarillar, pues, debido a su mayor coeficiente de dilatación térmica, la cascarilla se desprende y los trozos que aún permanecen adheridos pueden arrancarse con un cepillo de alambre.

4.4.1.3. Pulimento

El pulimento de las superficies metálicas puede lograrse por métodos electrolíticos o por métodos mecánicos.

El pulimento y el abrillantado se emplean para obtener superficies lisas y uniformes sobre las que se han de depositar recubrimientos electroplaqueados de estas características.

Estas operaciones pueden emplearse también para los acabados superficiales, como, por ejemplo, sobre los recubrimientos de níquel antes de proceder a la aplicación de cromo, o para los acabados de los latones o bronces.

El pulimento y el abrillantado son operaciones que se parecen mucho entre sí y la segunda sigue al pulimento en aquellos casos en los que desea obtener un brillo o color muy acusados. Ambos procesos emplean poleas giratorias.

Las poleas para pulimentar se fabrican a partir de fieltro, piel de foca, cuero, etc. cuyas superficies exteriores se revisten previamente con abrasivos, tales como esmeril, alúmina fundida o corindón, que se fijan a aquellas con cola.

Entre los abrasivos que más se emplean en la operación de bruñido se encuentra el trípoli (en su mayor parte constituido por sílice obtenida por la acción de los agentes atmosféricos sobre las rocas cuarcíticas), la piedra pómez, la púrpura de hierro, el esmeril, la piedra caliza dolomítica calcinada y el blanco de España.

El pulido electrolítico se basa en la disolución anódica de las protuberancias de la superficie metálica, con lo que se obtiene un perfil muy llano o, lo que es igual, una superficie muy regular. Pueden emplearse electrolíticos alcalinos o ácidos y se han desarrollado procesos para electro pulimentar todos los metales corrientes.

4.4.2. Normas para preparación de superficies

Incluimos aquí estas normas, ya que cualquier recubrimiento trae especificado el perfil que debe tener el substrato a proteger siendo esto muy importante para lograr la máxima eficiencia. Los métodos se han clasificado de acuerdo al congreso de pintores de estructuras de acero, en la siguiente forma:

(SSPC) Congreso de pintores de estructuras de acero. (Steel structures painting council)

Limpieza con disolventes (SSPC-SP1)

Es la limpieza por medio disolventes tales como el mineral Spirits, Xileno, Tolueno, etc. y que se usa para remover los contaminantes solubles en estos disolventes.

Limpieza con herramientas manuales (SSPC-SP2)

Este método de limpieza es el que se efectúa por medio de cepillos de acero, escariadores, espátulas o lijas.

Limpieza con herramientas mecánicas (SSPC-SP3)

Este método consiste en preparar las superficies por medio de cepillos eléctricos, esmeriles eléctricos, escariadores eléctricos etc.

Limpieza a la flama (SSPC-SP4)

Consiste en emplear una llama de oxiacetileno de alta temperatura pasada a alta velocidad sobre la superficie, pasándole después un cepillo de alambre para remover la escama de laminación suelta y herrumbre.

Limpieza con chorro de arena a metal blanco (SSPC-SP5)

Consiste en remover toda la herrumbre visible, escama de laminación, óxido, pintura vieja y contaminación por medio de un chorro de arena, la superficie queda ligeramente áspera para formar un apropiado patrón de anclaje el color de la misma se ve afectado por el color del abrasivo usado, aunque generalmente presenta un color blanco-grisáceo.

Limpieza con chorro de arena, grado comercial (SSPC-SP6)

Consiste en eliminar todo el aceite, grasa, suciedad, óxido, herrumbre, escama de laminación, pintura vieja y materiales extras excepto pequeñas sombras de herrumbre, óxido o ligeros residuos de pintura vieja que pueden permanecer sobre la superficie.

Limpieza con chorro de arena a ráfagas (SSPC-SP7)

Consiste en remover todo el aceite, grasa, suciedad, escamas de laminación suelta, óxido flojo y películas sueltas de pintura vieja.

Limpieza con ácidos (SSPC-SP8)

Se emplean varios ácidos agresivos que son controlados al poco tiempo por medio de lavado con agua, para remover la escama de laminación y materias extrañas al mismo tiempo que produce un patrón de anclaje bastante satisfactorio.

Intemperismo (SSPC-SP9)

Desprende la escama de laminación por medio de la alteración o desgaste debido a los agentes atmosféricos.

Limpieza con chorro de arena casi a metal blanco (SSPC-SP10)

En este método toda la grasa, aceite, suciedad, escamas de laminación, herrumbre, óxido, pintura vieja y otras materias extrañas deben ser removidas de la superficie excepto por sombras ligeras o pequeñas decoloraciones o rayas debidas al óxido y escamas de laminación que quedan fuertemente adheridas.

4.4.3. Métodos de galvanización

4.4.3.1 Inmersión

Desde el punto de vista teórico, el proceso de inmersión en caliente para el recubrimiento de las superficies metálicas con otros metales es muy sencillo.

Una vez limpio el objeto que se desea recubrir se sumerge en el metal caliente y se retira cuando se ha adherido a su superficie como película, la cantidad de metal fundido necesaria para obtener un recubrimiento de espesor deseado.

Sin embargo, en la práctica el proceso no es tan sencillo, aún recurriendo a la inmersión a mano. La limpieza preliminar de los productos metálicos que se van a revestir, la adición de fundentes a la superficie del baño de metal fundido, la regulación de la temperatura de éste y el empleo de los agentes de adición en el metal son factores importantes que, cada uno a su manera, influyen sobre la calidad del recubrimiento obtenido.

El proceso de inmersión utilizado en la producción de recubrimientos de zinc se realiza a mano o por medios semimecánicos, cuando se trata de objetos de forma irregular, tales como elementos estructurales, piezas, pernos, clavos, etc., o de artículos manufacturados, como latas, depósitos, cubos, etc. La inmersión de materiales de forma regular (chapas, alambres, tuberías, rejillas de alambre, etc.) se realiza con máquinas y da lugar a la producción de cantidades muy superiores a las que se obtienen con el proceso de inmersión a mano.

Proceso de galvanizado

Una vez terminado el desengrasado, la preparación de la superficie del metal que se va a recubrir consta de dos pasos siguientes:

Decapado con un ácido (ácido sulfúrico o clorhídrico diluidos),

Una vez el decapado ha concluido, la pieza se lava muy bien con agua fría y en ocasiones este lavado va acompañado de frotamiento para separar las sales de hierro o cualquier cantidad de éste que permanezca en la superficie estando finamente dividido, ya que, de no hacerlo así, tiene lugar una formación perjudicial de espumas en el baño de zinc que conduce a recubrimientos irregulares.

Los tratamientos con fundentes, cuyo objeto es evitar la oxidación de la superficie de acero hasta sumergirla en el zinc fundido, se realizan corrientemente con cloruro amónico - cloruro de zinc.

El baño ordinario empleado en el recubrimiento de chapas de acero contiene unas 30 toneladas de zinc fundido aunque son bastante corrientes los potes que contienen hasta 75 toneladas.

El tamaño debe ser lo bastante grande para mantener una temperatura constante razonable y compatible con la velocidad óptima de operación. Por lo general, un baño de estos debe contener de 20 a 40 toneladas de zinc para cada una de material que se galvaniza por hora.

La mayor parte de material base que se galvaniza está constituida por acero de bajo contenido de carbono (0.05 a 0.15 por ciento) aunque en el caso del alambre este porcentaje puede llegar hasta 1%.

La temperatura de trabajo media que se considera más adecuada para el recubrimiento de chapas es de 450 grados C y de 445 a 465 grados C en el caso del alambre.

Control del espesor

El espesor de las capas de aleación aumenta a medida que lo hacen el tiempo y la temperatura de tratamiento, y está influenciado por ciertos aditivos del baño, sobre todo por aluminio.

El espesor de la capa exterior viene determinado por la temperatura y velocidad con que las piezas se retiran del baño, con cuanta más rapidez se retire la pieza tanto más corto será el período de escurrido y tanto mas espeso el recubrimiento.

Los recubrimientos se especifican en gramos por metro cuadrado, a sí 330 gr./m cuadrado corresponden a un espesor de 0.045 mm.

Adiciones metálicas al baño de zinc

Aluminio

Mayor fluidez al baño, mayor penetración, disminución del espesor del recubrimiento, reducción en la capa de aleación, elevada ductilidad del recubrimiento.

Estaño

Mejora aspecto de la superficie, aumenta la uniformidad y adherencia del recubrimiento.

4.4.3.2 Cementación

Es de menor importancia que los de inmersión en caliente o de electroplaqueado. Las ventajas características de este tipo de recubrimiento son su resistencia superior a la abrasión y espesor uniforme, a pesar de la geometría de la pieza recubierta. La cementación es un proceso sumamente adecuado para el recubrimiento con zinc de piezas pequeñas, pero no se adapta muy bien al de chapas o de alambres.

Una vez efectuada la limpieza preliminar de los objetos que se van a recubrir, limpieza, que por regla general , no necesita ser tan concienzuda como la que exigen otros métodos de recubrimiento, aquellos se empaquetan en polvo de zinc contenido en un bidón de metal, que también hace las veces de camisa del horno si el calentamiento se va a realizar eléctricamente.

Antes de calentar las piezas con el polvo de zinc, éstas deben estar completamente secas y el recipiente herméticamente cerrado para evitar la entrada de aire y dotado, por consiguiente, de una tapa que se ajuste con mucha precisión.

Junto con las piezas que contiene, el recipiente se calienta con arrollamientos eléctricos dispuestos a lo largo de las paredes, o con gas, y se le hace girar lentamente durante el calentamiento.

Es preciso que el empaquetado de polvo de zinc no llene completamente el recipiente, con objeto de que pueda tener lugar un contacto íntimo entre dicho polvo y las piezas que se desea recubrir, a medida que gira el tambor. El recubrimiento obtenido es producido por una aleación superficial a una temperatura menor que la del punto de fusión de los metales.

4.4.3.3 Electroplaqueado

Los recubrimientos electro depositados son de un espesor más uniforme que los obtenidos por inmersión en caliente, menos porosos que los aplicados por proyección y de pureza más elevada. Otra ventaja es el control tan preciso y la gama tan amplia de espesores que es posible obtener.

Al revés de lo que ocurre con la inmersión en caliente, este tratamiento se lleva a cabo en frío y no registra ninguna pérdida de zinc.

Los principios fundamentales del proceso de electroplaqueado son de sobra conocidos, después de proceder a una limpieza cuidadosa, el objeto que se desea plaquear actúa como cátodo de una célula electrolítica; es decir, del baño de plaqueado.

El baño de plaqueado está constituido por una solución de la sal del metal que se desea electro depositar, por regla general el ánodo de esta célula está constituido por el mismo metal que se desea electro depositar (zinc).

La operación de electroplaqueado se lleva a cabo haciendo pasar por la célula una corriente producida por un acumulador, un generador de corriente continua, o bien una corriente alterna rectificada. Los baños plaqueados son de los tipos siguientes: baños ácidos y soluciones alcalinas de cianuro.

El funcionamiento favorable de un baño de plaqueado exige el control de tres variables por lo menos: composición química de la solución de plaqueado, temperatura de la solución y densidad de la corriente catódica.

Los espesores que corrientemente se especifican para los recubrimientos de zinc, son de 0.025 mm (o más), para los casos de exposición intensiva a los agentes atmosféricos, 0.0125 mm. en el caso de las intermedias y de 0.00375 mm. cuando aquellas son ligeras.

4.4.3.4 Proyección

La obtención de recubrimientos protectores del metal por proyección ha alcanzado una importancia considerable, ya que es el único método que se presta a la aplicación de recubrimientos al aire libre.

En efecto, los recubrimientos por proyección de zinc y aluminio, sobre los que, una vez depositados se aplica una pintura buena, constituyen uno de los mejores procedimientos para proteger el acero que se encuentra en medios muy corrosivos, aunque su costo es más elevado que los otros métodos.

Cualquier metal en la forma de alambre y susceptible de fundirse en la llama del soplete de oxiacetileno puede proyectarse sobre cualquier superficie; aunque los más usados para este fin son el aluminio y el zinc.

Aunque el proceso de proyección es particularmente adecuado para la aplicación de recubrimientos a estructuras grandes tales como depósitos, puentes, etc. también se emplea para recubrir piezas pequeñas, y reparar las averías provocadas en los acabados galvanizados durante la soldadura.

Otras aplicaciones de la proyección con zinc se dan en los recubrimientos de depósitos de gas, los de agua (por dentro y fuera), los puentes y vagones de ferrocarril, las compuertas de las esclusas de los canales, los oleoductos y las tuberías de agua de las centrales generadoras de energía.

Métodos de Proyección de Metales

Existen tres métodos generales de proyección de metales, que se diferencian en la utilización de estos en tres formas físicas distintas:

- 1) Alambre
- 2) Polvo
- 3) Metal fundido.

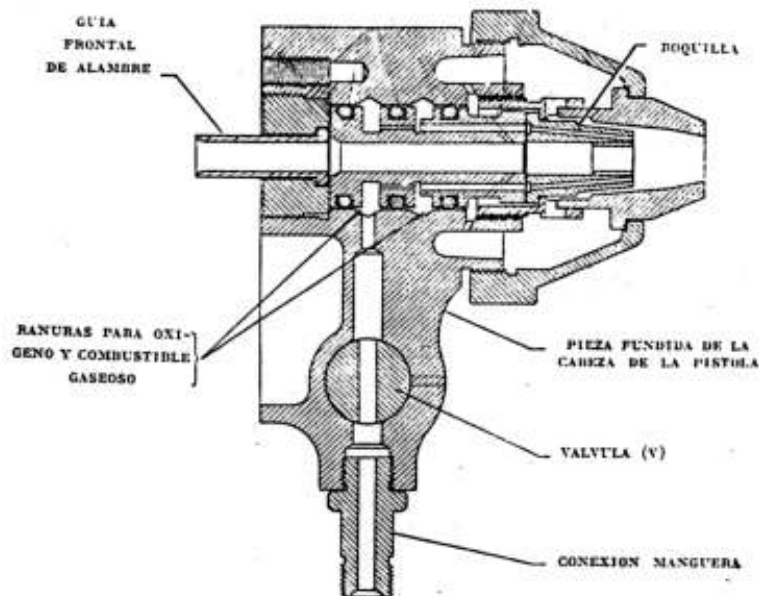
De éstos el basado en la proyección partiendo de alambre es el más importante; el aparato empleado en este caso consta de un compresor de aire y de los engranajes adecuados para alimentar el metal en forma de alambre a través de la llama de un soplete de oxígeno, llama que sale por un espacio anular que rodea el tubo central.

A medida que el alambre avanza se funde por efecto de la llama a alta velocidad, se pulveriza con un chorro de aire comprimido y a través de una boquilla, se proyecta contra la superficie que se desea recubrir.

Las pistolas modernas de proyección se construyen para cargas de alambre de 1/8 a 3/16 de pulgada y gas oxiacetilénico, se requiere una fuente de aire comprimido de 1m cúbico / min. aproximadamente a una presión de 5kg/cm. o aún más elevada dependiendo del diámetro del alambre.

Es aconsejable realizar la operación a una distancia de 20 a 25 cms. de la superficie que se va a metalizar, en la fig. 15 se muestra un corte transversal de la cabeza de una pistola de alimentación por alambre.

Figura 15. Corte Transversal de la Cabeza de la Pistola de Alimentación por Alambre



Fuente. R. M Burns y w.w Bradley. **Recubrimientos protectores de los metales pagina 112**

El proceso de proyección con polvos metálicos depende de la fusión de las partículas metálicas que se encuentran suspendidas en un medio gaseoso impulsado por la llama de un soplete. El tamaño de las partículas de polvo oscila entre 150 y 300 mallas según el punto de fusión del metal.

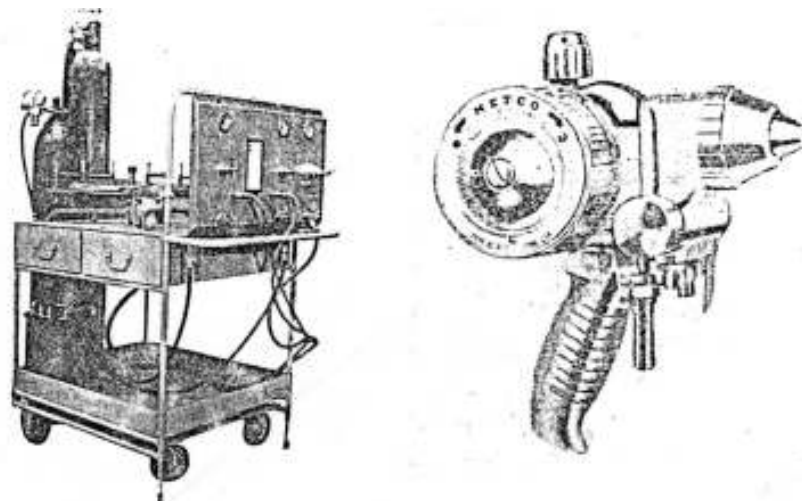
Hay que indicar que las de mayor punto de fusión se aplican en menor diámetro de partículas de polvo, el cual debe estar seco y exento de grasa; el método de aplicación es muy similar al de proyección de alambre.

El proceso de metal fundido se ha aplicado principalmente a la proyección de las aleaciones de plomo, estaño, bismuto, antimonio y cadmio de bajo punto de fusión.

Por regla general, la adherencia de los recubrimientos aplicados por proyección depende de una adecuada estructura física de la superficie y, por consiguiente, se concede una considerable atención a la operación de tratamiento con chorro abrasivo, con el cual puede lograrse adherencias del orden de 100 a 150 Kg./cm. cuadrado.

Se considera que por este método (figura 16) no se registra ninguna acción aleante entre los metales de recubrimiento y base y los espesores obtenidos oscilan entre 0.125 y 1 mm.

Figura 16. Equipo portátil moderno de metalización



Fuente. Orlowski y Cauchetier. **Protección por proyección a pistola pagina 38**

5. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

En este capítulo hacemos prácticamente un resumen de los pasos elementales que el Ingeniero o el Encargado de Mantenimiento debe saber para preservar todos aquellos elementos susceptibles a la corrosión. El método a seguir para obtener los mejores resultados es el siguiente.

5.1 Identificación de los elementos con riesgo de corrosión

Localización o determinación de los elementos que por su naturaleza o posición dentro de la planta están amenazados por el ataque corrosivo por ejemplo: Estructuras metálicas, tanques de agua o combustibles sumergidos o elevados, depósitos de productos químicos, alimentos, tuberías de alta presión etc.

5.2 Análisis del medio corrosivo

Después de haber detectado un ataque corrosivo o tomado la decisión de proteger algún substrato por la importancia de éste, el paso a seguir es muy importante y consiste en el análisis del tipo de ambiente que envuelve la estructura a proteger y de este depende el método de protección correcta a utilizar.

Una misma planta industrial puede tener varios tipos de ambientes corrosivos por lo que es importante identificar cada una de sus áreas para hacer un análisis correcto, los ambientes se clasifican de la siguiente forma:

Ambiente tipo A (Agresivamente corrosivo)

Inmersión en líquidos químicos muy corrosivos, excesiva exposición a productos químicos. Este medio ambiente ocurre en una área caracterizada por humos, gases, polvos o líquidos de productos químicos agresivos que se combinan con la alta humedad o vapor de agua condensada.

Estos elementos unidos pueden corroer el acero al carbono en una razón mayor de 6 milésimas por año.

El área del ambiente tipo A generalmente se considera que está dentro de un radio promedio de 50 mts. alrededor de la fuente de contaminación.

Ambiente tipo C (Corrosivo)

Derrames y salpicaduras frecuentes de líquidos corrosivos, concentración de vapores corrosivos. Es menos destructivo que el tipo "A" y ocurre en aquellas áreas donde hay concentración de vapores, humos, polvos o líquidos de productos químicos moderadamente corrosivos, unidos con humedad y condensado.

Este ambiente corroe el acero al carbono a una razón de 3 a 7 milésimas por año y el zinc de menos de una milésima por año. Muchas veces un ambiente tipo "A" se convierte en tipo "C" cuando está a más de 50 metros alrededor de la fuente de contaminación y hasta una distancia limitada.

Ambiente tipo M (Moderado)

Atmósfera industrial normal, exposición a la intemperie.

Este ambiente generalmente se caracteriza cuando se exponen las superficies en el exterior y a la intemperie y, o, ligeras o moderadas concentraciones de vapores químicos unidos a la humedad o vapor de agua condensada.

El acero al carbono en esta exposición se corroe a una velocidad menor de 3 milésimas por año, mientras que el zinc, en este medio ambiente prácticamente está libre de corrosión. Moderadas concentraciones de vapores químicos en áreas interiores con excesiva humedad pueden producir condiciones similares.

Ambiente tipo P (Protegido)

Ocurre en Interiores Industriales Normales, en este medio ambiente las superficies generalmente están expuestas a la humedad normal de interiores y no están sujetas al ataque de contaminantes químicos que corroen el acero.

Ambiente tipo S (Subterráneo)

Es el medio ambiente a que están sometidos el acero y el hierro cuando están enterrados en suelos húmedos y corrosivos (determinado de acuerdo con el análisis del suelo)

5.3 Alternativas de protección

Al haber analizado e identificado los distintos grados de exposición que se quieren proteger se procede a escoger entre las alternativas más comunes y sobre de las que hay más experiencia el método más efectivo, económico y sobre todo práctico.

Se describen en orden de importancia decreciente.

- a. Diseñado en la ingeniería de modo tal que se eviten puntos sensibles al ataque corrosivo
- b. Protegiendo por medio de recubrimientos.
- c. Usando protección catódica (expuesto más adelante)
- d. Especificando materiales resistentes a la corrosión (tabla V)
- e. Alterando los medios (uso de inhibidores)
- f. Sobre-diseñando. (caminos de acero más gruesos para compensar las pérdidas de metal por corrosión).

Aunque muchos de estos puntos ya fueron tratados en el capítulo 4, describiremos en una forma detallada aquellos que no han sido tratados.

5.3.1 Protegiendo equipos y estructuras de la corrosión desde su diseño

Los elementos de diseño apropiados desde el punto de vista de aplicación y eficiencia de recubrimientos y mantenimiento de los mismos son los siguientes:

- Se prefieren superficies planas
- Superficies redondas o curvas son preferibles que ángulos pronunciados.
- Deben evitarse las rendijas o hendiduras

- Las superficies deben ser lisas, las soldaduras suavizadas y las salpicaduras removidas.
- Se prefieren las soldaduras a los remaches .
- Los remaches avellanados se prefieren a los remaches de otros tipos
- Los rebordes montados deben ser soldados
- Se prefiere las soldadura continua
- Deben eliminarse las superficies de empalme.
- No deben usarse superficies de extremo flexible
- Todas las superficies deben estar convenientemente drenadas.
- Los puntos de contacto para andamios deben removerse y la superficie esmerilarse, limpiarse y calafatearse cuidadosamente, todos los ángulos, rebordes, rendijas etc. que no puedan alcanzarse efectivamente con el recubrimiento.
- Recubrir con manos adicionales de pintura todas las aristas, remaches etc. que forman lugares de inicio de corrosión.-
- Esmerilar todas las aristas pronunciadas y superficies rugosas.
- Remover las costras de laminado
- Localizar las piezas de carga que estén muy expuestas y trasladarlas a lugares menos expuestos.

5.3.2 Protección por medio de recubrimientos

Este es el método más empleado, económico y práctico, el cual ya fue tratado ampliamente en el capítulo 4. En lo que respecta a los distintos tipos metálicos y no metálicos; sus ventajas y desventajas.

En este capítulo trataremos exclusivamente de indicar la actitud que debe tomar el Ingeniero luego de haber determinado las condiciones ambientales, requisito este para seleccionar el recubrimiento más adecuado para la protección que pretendemos.

Por lo regular los especialistas en recubrimientos anticorrosivos tienen amplia experiencia en la selección de cada tipo de recubrimiento para cada tipo de problema, por lo que la asesoría de estas personas es muy importante.

Algunas especificaciones técnicas de algunos productos, fichas como estas nos pueden ayudar en determinado momento a seleccionar el recubrimiento adecuado, modo de preparación, tratamiento de superficies etc.

No está demás indicar que hay una amplia variedad de recubrimientos para casi todos los tipos de problemas, información que proporciona el distribuidor o fabricante. Ver en anexos ejemplos de fichas de especificaciones de pinturas protectoras

5.3.3 Protección catódica

La creciente demanda de combustibles derivados del petróleo, ha llevado a países como México a la exploración y explotación en el golfo de México. La extracción de hidrocarburos de estos yacimientos marinos se hace perforando pozos direccionales desde plataformas metálicas fijadas en el lecho marino, que tienen capacidad para recibir hasta 12 pozos cada una de ellas.

La producción de aceite, gas asociado y agua de formación, se envían directamente a tierra por medio de ductos marinos de aproximadamente 20 y 30 km., ofreciendo estos serios problemas para su mantenimiento.

Cualquier reparación en ese medio resulta excesivamente costoso. Siendo ésta la razón de prever su destrucción prematura.

Procedimiento

En la práctica, la corrosión externa de los ductos submarinos y terrestres se prevé o reduce a un mínimo aceptable, utilizando los siguientes procedimientos:

- a. Aplicando recubrimientos con propiedades dieléctricas para aislar la tubería del medio corrosivo.
- b. Empleando sistemas de protección catódica que evitan la emigración de iones metálicos.

Aun cuando estos métodos pueden usarse por separado se acostumbra combinarlos para lograr un mejor efecto, y así es como por lo general las superficies metálicas se protegen en su mayor extensión con un recubrimiento y se dejan solo áreas mínimas para la protección a través de corriente directa.

Los recubrimientos más usados son:

- Alquitrán de hulla
- Cintas de polietileno
- Plásticos aplicados por extrusión

Normalmente sobre los anteriores se aplica una capa de concreto reforzado con malla de alambre galvanizado, cuya función es evitar la flotación de la tubería; además de impartir una protección mecánica al recubrimiento dieléctrico.

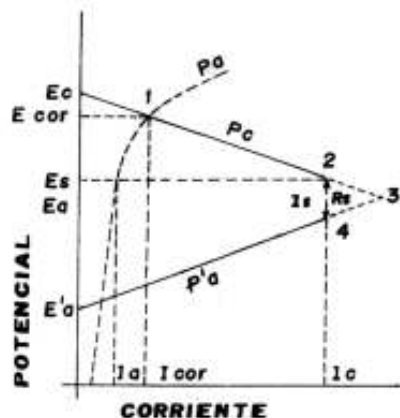
Definición y principios básicos de la protección catódica

La protección catódica es la aplicación de un corriente directa a una estructura metálica, de manera que ésta constituya la parte catódica del circuito, cuya finalidad es disminuir la corrosión.

La protección catódica está basada en el conocimiento de que la disolución de un metal por corrosión va acompañada de una corriente eléctrica equivalente, que en el electrolito fluye desde las regiones anódicas que se disuelven, a las catódicas, donde ocurre la reducción correspondiente a toda oxidación.

Representando gráficamente el proceso de corrosión mediante las curvas de polarización de ánodos y cátodos locales se obtienen en la intersección de éstas el potencial y la corriente de corrosión. Cuando el potencial de corrosión desciende, la intensidad de la corriente anódica disminuye con arreglo a la curva de polarización anódica.

Figura 17. Curva de polarización en la protección catódica



P_c : Polarización catódica del metal a proteger

p_a : Polarización anódica metal a proteger

p'_a : polarización anódica del metal protector

(1) corrosión normal

(2) potencial del metal protegido.

Fuente. Viet Loik. **Corrosión e incrustación en tuberías** página 566

Como puede observarse en la figura 17, el segmento 2-4 representa la caída de potencial en el electrolito (dada por $I_s R_s$, donde I_s : corriente de protección y R_s : resistencia del electrolito).

Debido al carácter asintótico de la curva de polarización anódica del metal a proteger, no se logrará una protección total, siempre se tendrá una pequeña disolución del metal correspondiente a la corriente I_a .

Métodos de protección

Son dos los principales métodos de aplicación de protección catódica. Uno de los métodos emplea ánodos que son energizados por medio de una fuente externa de corriente directa: Los ánodos son instalados en el electrolito y son conectados a la terminal positiva de la fuente de corriente directa en tanto que la estructura por protegerse se conecta a la terminal negativa.

El segundo método consiste en el uso de ánodos sacrificables, es decir, electrodos construidos de un metal electronegativo que el que se desea proteger.

Diseño

Para diseñar un sistema de protección catódica es necesario seleccionar el método a usar de acuerdo a sus características y la funcionalidad del recubrimiento de la estructura.

Es conveniente colocar señalamientos que indiquen la longitud de la tubería según el caso y a la vez sirvan para hacer lecturas de potenciales.

Una vez aislada la estructura por protegerse mediante tuercas unión aislantes o juntas instaladas en las bridas, se procede a efectuar levantamiento de potenciales naturales tubo-suelo y en seguida, a la prueba de requerimiento de corriente.

Esta se lleva a cabo con una fuente de C.D., capaz de desarrollar un voltaje mayor que las unidades permanentes, de manera que permitan usar ánodos auxiliares de prueba de bajo costo. Se puede usar para el caso una máquina de soldar de una potencia de 2.5 Kw.

5.3.4 Uso de inhibidores contra la corrosión de calderas

Inhibidor

Es una sustancia química o una mezcla de sustancias que se agregan a un sistema.

Usualmente en concentraciones pequeñas con el fin de disminuir o evitar el ataque corrosivo. Generalmente, los inhibidores efectúan su trabajo en la fase líquida.

En las regiones anódicas son llamados inhibidores anódicos, en las regiones catódicas son llamados inhibidores catódicos; y los formadores de película que actúan en ambas regiones.

En las calderas la corrosión aumenta severamente a presiones mayores de 40 Kg./cm. cuadrado (600psi).

5.3.4.1 Precaldera

- Bomba de agua de alimentación
- Tuberías que conducen el agua de reposición

Problemas comunes

- Exceso de oxígeno disuelto en el agua por falla del desareador.
- Depósitos debido a mala clarificación de un precipitador o precipitación directa de Ca, CO₃, Fe, Mn, etc.

Métodos para evitar la corrosión

- Pre-tratamiento químico al agua de repuesto, para evitar precipitados en las superficies metálicas.
- Precipitación con cal y soda en frío o caliente, o por intercambio iónico con resinas sintéticas.
- Desarear el agua de alimentación por medios mecánicos y químicos. El sulfito de sodio catalizado baja la concentración de oxígeno disuelto de saturación (8-9 ppm) a cero, igualmente lo hace la hidracina.
- Elevar el Ph a 9 para evitar la corrosión general, generalmente se logra agregando: amoníaco (menos de 0.5 ppm), ciclohexilamina (2 ppm) y recirculando agua de la caldera.

- Evitar los depósitos, mejorando la coagulación, mejorando la capacidad de los filtros y estabilizando el agua por medio de poli fosfatos de sodio que evitan la precipitación de Ca, Fe, Mn. (Los poli fosfatos se agregan en dosis pequeñas (0.5 a 9 ppm).

5.3.4.2 Caldera

Conversión de agua a vapor por medio de la quema de un combustible.

Problemas comunes

- **Depósitos**

Debido a la precipitación de las sales contenidas en el agua de alimentación por el aumento de la presión y temperatura; éstos disminuyen la conductividad térmica, sobrecalentado y modificando la estructura metalográfica de los metales, originando fallas por picaduras localizadas, corrosión por oxigenación diferencial. Entre los depósitos más comunes y térmicamente más dañinos en orden decreciente son:

Analcita

Fosfato de Magnesio

Magnetita

Fosfato de Calcio

- **Arrastres**

De agua líquida en forma de pequeñas gotas que sale junto al vapor: Es causa de depósitos de corrosión en el área de post-caldera debido a su alto contenido de sales.

Los arrastres provocan el mayor problema de acumulación de sílice (se introduce en el vapor debido a su solubilidad con él) sobre los alabes y válvulas gobernadoras de las turbinas produciendo abrasión, desgaste y desbalanceo mecánico.

Las sales que llegan a ser arrastradas con el agua son mezclas de NaCl, Na₂SO₄, NaOH, etc., si estas van a dar al sobrecalentador y se condensan la corrosión será muy intensa peor aún si se apaga la caldera. Los arrastres son resultado de espumeo, transporte mecánico, variaciones bruscas en la evaporación y solubilidad de sólidos en el vapor.

- **Corrosión**

El problema más complicado y dañino de la calderas es la corrosión; entre los factores que la pueden iniciar están: oxígeno disuelto, altas temperaturas y presiones, esfuerzos mecánicos, altas concentraciones localizadas de sosa cáustica, erosión, condiciones peculiares de flujo, dióxido de carbono disuelto, depósitos de sales, metales y óxidos metálicos.

Los tipos más comunes de corrosión en el área de caldera son los siguientes:

- **Picaduras localizadas**

perforaciones sobre la pared metálica ocasionadas por el oxígeno disuelto que penetra y rompe la película protectora magnetita produciendo Fe₂O₃, este ataque es favorecido también por los depósitos, impurezas etc.

- **Corrosión por concentración**

Esencialmente sosa cáustica, localizadas en áreas específicas sobre las cuales hay depósitos, flujo estático de líquido, hendiduras o sobrecalentamiento local. Se ha determinado que a un PH de 11 a 12 se obtiene un máximo de protección.

- **Fragilización cáustica**

Corrosión ínter cristalina selectiva por presencia de grandes esfuerzos mecánicos, altas concentraciones de sosa cáustica, y contener SiO₂ en pequeñas cantidades que actúa como acelerador del ataque.

- **Corrosión por esfuerzos mecánicos**

El metal debe ser susceptible a la corrosión a lo largo de una trayectoria continua como la frontera de los cristales, su estructura debe ser microscópicamente heterogénea y la fase continua anódica respecto a la fase dispersa y estar sometida a un gran esfuerzo tensil.

Bajo estas condiciones la corrosión procederá a lo largo del camino anódico auto acelerándose al quedar expuestas nuevas superficies anódicas, el Ion, cloruro y oxígeno disuelto intensifican el ataque.

- **Corrosión-erosión**

Por los general se presenta en las áreas donde se altera el sentido normal del flujo causando turbulencias que rompen las películas protectoras.

Métodos para evitar la corrosión

En el caso de los depósitos

- Mejor pre-tratamiento al agua disminuyendo al mínimo las sales disueltas.
- Agregar dispersantes orgánicos como: taninos, ligninos, alginatos, almidones, etc., estos hacen fluidos y no adherentes a los precipitados. Los ligninos desulfonados dispersan la magnetita, evitando los depósitos de éste que son tan aislantes y difíciles de desprender.
- Agregar secuestrantes o versenatos; evitan la formación de lodos y disuelven lentamente las incrustaciones de Fe, Mg, Ca, Cu etc. ya formadas.
- Los versenatos, son corrosivos para las tuberías de agua de alimentación por lo que se debe tener en cuenta este aspecto.

En el caso de los arrastres

- Mantener la concentración de aceite tolerable en las calderas (7 ppm) o menos del 1% de sólido en suspensión.
- Mantener la concentración de sólidos disueltos en su valor mínimo; para obtener un vapor seco libre de arrastres, esta concentración se mantiene por medio de purgas continuas.

- Para el control de arrastres por espumeo, agregar antiespumantes como: polioxialkilenglicoles, poliamidas, poliamidas insaturadas, etc., mezclándolos con dispersantes como taninos o ligninos.

En el caso de corrosión de la caldera

- Mantener la película de magnetita lo más intacta posible (ya que ésta es protectora hasta cierto punto).
Para lograrlo es necesario mantener el oxígeno fuera del sistema, mantener una concentración adecuada de alcalinidad, mantener limpias las superficies.
- Eliminar el oxígeno y demás gases no condensables desareando el agua de alimentación o manteniendo un residual de sulfito o de hidracina para asegurar la total eliminación del oxígeno teniendo cuidado que el residual de hidracina y sulfito en exceso ataca intensamente los tubos de los condensadores
- Mantener una concentración de Nitratos de entre 35 y 40% de la alcalinidad total calculada como Na OH.
- Los taninos ayudan a evitar la fragilización y corrosión.
- La erosión-corrosión en tubos de calderas se ataca de la siguiente manera.
- Rediseñando el sistema para evitar el flujo turbulento eliminando los depósitos y manteniendo los tubos limpios.
- Evitando la corrosión de cobre en precaldera.

- Manteniendo dosis adecuadas de agentes reductores del oxígeno.

5.3.4.3. Post- caldera

a) sobrecalentador

Problemas comunes:

- Arrastre de sales por espumeo desde la caldera, depositándose en el sobrecalentador para actuar como electrolito que acelera la corrosión
- Condensación del vapor al apagar y dejar enfriar la caldera, el CO₂ y O₂ de la atmósfera se disuelve causando ataque por picaduras.
- Por reacción del metal con el vapor de alta temperatura.

b) Sistema de condensado y retorno

Problemas comunes:

- Formación de productos sólidos insolubles que tapan las tuberías pequeñas y los orificios.
- Costo y frecuencia de reposición de tuberías y válvulas dañadas por picaduras excesivamente altas.

Causas de la corrosión en post-caldera

La causa principal, es la solubilización de varios gases que tienen efectos corrosivos tales como el CO₂, el oxígeno y en algunos casos el H₂S siendo raro encontrar este último.

Inhibición de corrosión en post-caldera

Sobrecalentador

- La reacción directa del metal con el vapor a alta temperatura , no se revuelve con ningún inhibidor, sino usando una aleación adecuada.
- El arrastre de sales por el vapor se evita, instalando separadores de vapor bien diseñados, si esto no fuese suficiente, deberán usarse antiespumantes.
- La corrosión de sobrecalentadores por condensación del vapor se inhibe de igual forma que la corrosión en los sistemas de condensado y retorno que se tratarán a continuación.

Sistema de condensado y retorno

- El método de evitar la agresividad del condensado debe basarse en la eliminación del CO_2 y el O_2 disueltos.
- El oxígeno se elimina normalmente desde la caldera, por medio de un residual permanente de algún agente reductor.
- El oxígeno encontrado en el condensado, viene por lo regular de fugas en el sistema que por lo general trabaja al vacío, por lo cual lo más conveniente es localizar y eliminar las fugas.

- En caso de no ser posible de la forma anterior se puede agregar sulfito de sodio, pero lo mejor es agregar aminas volátiles al agua de la caldera para aumentar el PH del condensado, con lo cual se minimiza el ataque por oxígeno.
- El problema de la corrosión por ácido carbónico se resuelve exitosamente con la adición de aminas volátiles o neutralizantes, estos se agregan al agua de la caldera, se volatizan simultáneamente con el vapor, se condensan con él, neutralizan el CO₂ y producen un condensado con un PH neutro o alcalino.
- Después de haber evaluado un gran número de aminas se ha encontrado que sólo dos de ellas reúnen las cualidades satisfactorias; la morfolina y la ciclohexilamina.
- El PH ideal para evitar el ataque por CO₂ varía entre 8 y 9 siendo el valor intermedio de 8.5, un valor satisfactorio.

5.3.5. Protección de cables de alambre de acero de la corrosión

Desde la primera vez que el hombre torció un hacesillo de vides o fibras, uniéndolas para formar una cuerda que usó para atar un bulto de leña o una gavilla de maíz, todas las cuerdas (ya sea de estructura vegetal o metálica) se consideran, en general, de utilidad para el mismo propósito.

Sin embargo, las cuerdas de lino, manila o henequén tienen limitada resistencia y se usan generalmente solo para trabajo manual, en barcos pequeños o en la granja.

Por otra parte, los cables de alambre de acero son más fuertes por esto pertenecen al reino de la maquinaria de propulsión mecánica; forman parte de máquinas y mecanismos de propulsión de igual forma que las cadenas, engranajes y flechas de mando.

Los cables de alambre de acero se emplean: en grúas de construcción e industria, para operaciones mineras y malacates, en los aparejos y garruchas elevadoras en los barcos, para soportar la carga en los puentes colgantes, para grúas y elevadores.

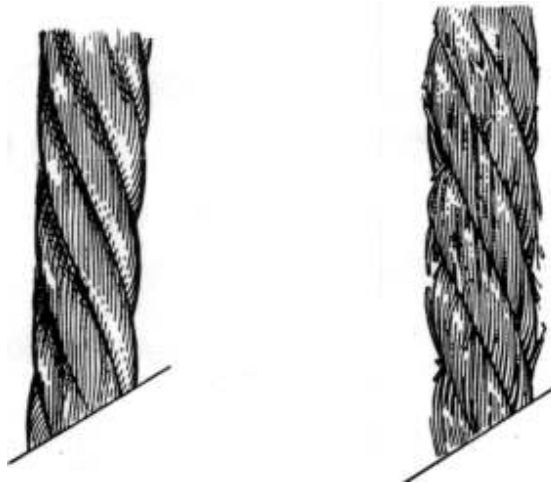
5.3.5.1 Orígenes del ataque por corrosión

Los cables de alambre expuestos a la intemperie y la atmósfera pueden ser rápidamente atacados por la corrosión. Algunas veces, el daño se oculta entre los torones interiores del cable hasta que bruscamente, el cable se rompe produciendo daños, lesiones y en ciertos casos la muerte.

Si examinamos un tramo de cable de alambre, teniendo en cuenta la corrosión, comprendemos con cuanta facilidad puede comenzar y desarrollarse el ataque. Casi parece que hubiera sido diseñado para atraer corrosión.

Forma una masa de ranuras y hendiduras en los que la humedad y las sustancias químicas nocivas encuentran cómodo alojamiento.

Figura18. La humedad puede penetrar fácilmente en el tejido abierto y destruir los torones de un cable de acero.



Fuente. Hendrick T. W. **La corrosión y como evitarla pagina 46 y 47**

Los cables de alambre pueden recibir la embestida de los siguientes orígenes:

Agua de mar, agua dulce, vapor de agua y condensación, sustancias químicas disueltas en el agua de lluvia; sustancias éstas que sirven como electrolito para que se produzca la corrosión electroquímica, al estar el cable en contacto con otros metales como poleas de bronce o latón de tambores de malacate.

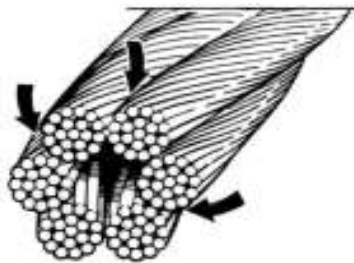
5.3.5.2 Estructura de los cables de alambre

Para evitar la corrosión; debemos examinar la estructura de un cable de alambre. Está formado alrededor de un núcleo de preferencia hechos de yute.

Cuando se fabrica el cable, el núcleo se impregna con un lubricante especial que da al cable flexibilidad y también lo ayuda a resistir el ataque de la corrosión.

El cable de acero está formado de "Torones" éstos están enrollados en capas alrededor del núcleo. Mientras más apretadas entre sí están las capas, menor será el riesgo de que penetre la corrosión hacia el núcleo. Cada torón está formado por varios alambres, de tal modo que un cable puede componerse de cualquier combinación, desde 6 torones de 7 alambres (6x7) hasta (11x37) o más.

Figura 19. Estructura de un cable de acero, mostrando la zona de ataque entre los torones.



Fuente. Hendrick T. W. **La corrosión y como evitarla pagina 46 y 47**

5.3.5.3 Revestimientos contra corrosión

Algunos cables de alambre de acero reciben durante su fabricación cubiertas protectoras, tales como:

- Galvanización: Baños de zinc por inmersión en caliente o rociando el cable (este género de protección es muy común y se emplea para tirantes y retenidas y para vientos y suspensiones)
- Protección por Cadmio o Cromo: (esto no es de uso general, sino sólo para fines especiales)
- Forro de Fibra: Cada torón está cubierto con un forro de fibra, que al apretarse forma una superficie lisa. El forro es resistente a la humedad y ayuda a impedir que penetren a los torones las materias químicas y los gases corrosivos.

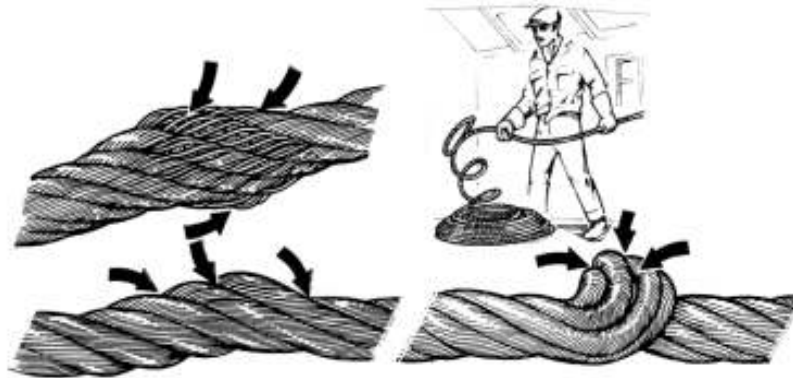
5.3.5.4 Mantenimiento preventivo

La lucha contra la corrosión comienza cuando el cable de acero se recibe de la fábrica. El cable puede estar en forma de rollo suelto o enrollado sobre un carrete. Al desenrollar el cable, lo más importante es impedir que se formen "cocas". Si se forma una coca, el cable se debilita y su vida se acorta; las cocas también abren los torones, de modo que se facilita el ataque de la corrosión, cuando se producen cocas graves, los alambres pueden romperse con facilidad.

Para desenrollar el cable de un rollo, éste no deberá tenderse en el piso ni tirarse del cable en gasas, ya que esto puede producir cocas.

El rollo deberá mantenerse verticalmente y hacerse rodar de tal modo que el cable quede tendido en el piso. Si se recibe enrollado en un carrete, éste deberá montarse sobre un eje y desenrollarse el cable sobre la línea recta.

Figura 20. Forma errónea de desenrollar un cable, dando como resultado la formación de cocas y abertura de los torones.



Fuente. Hendrick T. W. **La corrosión y como evitarla** pagina 49 y 50

5.3.5.5 Mantenimiento durante el servicio

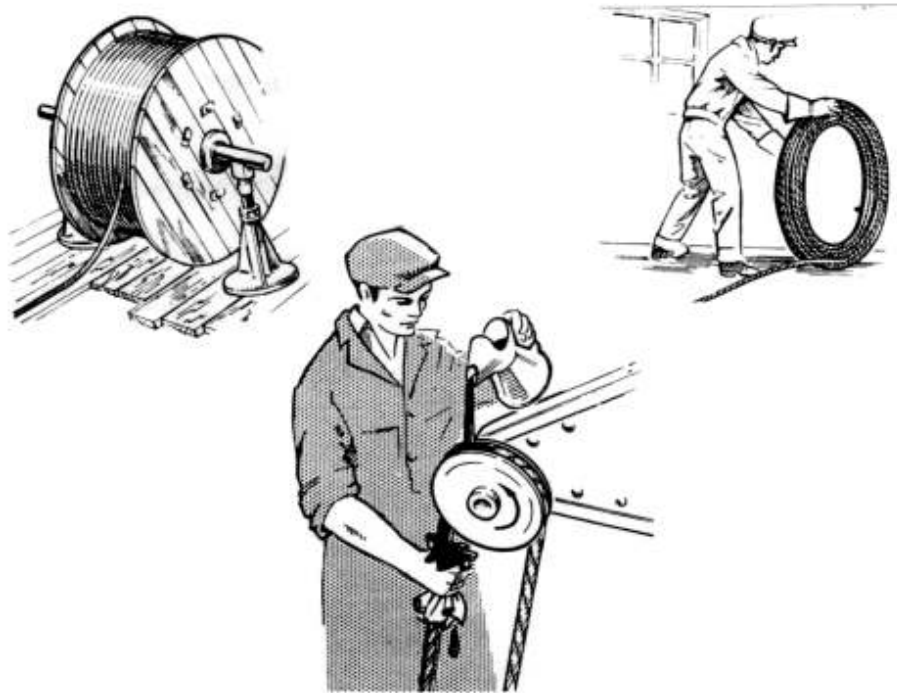
No hay lubricante general que pueda recomendarse como apropiado para todos los cables de alambre, bajo todas las condiciones a considerar:

- a) Temperatura de trabajo
- b) Presencia de humedad
- c) Presencia de gases corrosivos
- d) Naturaleza del trabajo

Los fabricantes de materiales para la lubricación recomendarán un aceite particular que satisfaga condiciones especiales.

Los aceites deberán aplicarse en la forma que muestra la figura 21 (nótese la pieza de género o copa de madera sostenida debajo del flujo) para hacer que el aceite se distribuya uniformemente alrededor y entre los torones.

Figura 21. Forma correcta de desenrollar un cable, limpieza y lubricación del mismo.



Fuente. Hendrick T. W. **La corrosión y como evitarla pagina 51**

El cable debe estar limpio y seco antes de aplicar el lubricante. Después de utilizarse durante algún tiempo, el cable se cubrirá con el polvo que recoge el lubricante. Para limpiarlo deberá limpiarse primero con aceite delgado para aflojar la tierra y entonces la costra reblandecida podrá soplarse con un chorro de aire comprimido, o en el caso de estar dura todavía, puede cepillarse con un cepillo de alambre.

CONCLUSIONES

1. El tipo de corrosión más común ocurre a temperatura ambiente o una temperatura próxima a esta, como resultado de la reacción de los metales con el agua o con soluciones acuosas de sales, ácidos o bases.
2. Desde el punto de vista teórico, la diferencia entre las reacciones químicas y electroquímicas no es significativa, por lo que se considera que en cualquier tipo de corrosión ocurre un proceso electroquímico.
3. La corrosión electroquímica es el resultado de las reacciones anódicas y catódicas del metal. En el ánodo los electrones se depositan a medida que los iones metálicos se desprenden y en el cátodo los electrones están siendo absorbidos por iones hidrógeno de la solución.
4. La esencia de la corrosión electroquímica consiste en una reacción anódica que implica la donación de electrones por el metal que se corroe, por lo tanto la determinación eléctrica de la tendencia de un metal a donar electrones puede servir como un criterio básico acerca de la resistencia a la corrosión de dicho metal.
5. La tasa de corrosión o pérdida de peso de una área determinada del metal que se corroe, es proporcional a la densidad de la corriente resultante de las reacciones anódicas y catódicas.

6. Las variables físicas y químicas de los ambientes corrosivos y los esfuerzos mecánicos a que son sometidos los metales hace que los métodos de protección sean numerosos.
7. La corrosión es un fenómeno natural de los metales, su control es el objetivo, lo cual puede lograrse en el metal, en la interfase metal-ambiente o alterando el medio ambiente corrosivo.
8. Entre los métodos mas usados en orden de importancia para la protección de los metales tenemos:

En el diseño; evitar puntos sensibles al ataque corrosivo (soldaduras, empalmes, remaches, hendiduras etc.)

Protegiendo por medio de recubrimientos metálicos y no metálicos (pinturas protectoras y galvanizado)

Especificando materiales resistentes a la corrosión (aceros inoxidable)

Usando protección catódica (oleoductos submarinos o subterráneos)

Alterando los medios por medio de inhibidores (agentes químicos utilizados por ejemplo en las calderas)

9. El aspecto más importante en la protección por medio de recubrimientos ya sean metálicos o no metálicos (Galvanizado y pinturas protectoras) está la preparación de las superficies, para lo cual se han desarrollado normas y técnicas de limpieza para cada producto a utilizar ya que de ello depende el éxito del mismo en el control de la corrosión.

RECOMENDACIONES

1. La importancia y consecuencias que se encuentran al investigar y comprender el tema de la corrosión, nos debe llevar a integrarlo como una variable de estudio.
2. Es importante conocer y entender el tema de la corrosión para que el estudiante lo posea como una herramienta útil en su desempeño profesional.
3. Conociendo cómo afecta la corrosión a los materiales de ingeniería, especialmente al acero; reviste de importancia tomarse en cuenta en el momento de diseñar, escoger materiales o prever métodos preventivos; conociendo el medio ambiente al que estarán expuestos.
4. Es importante hacer consciencia sobre como prevenir la corrosión, ya que es el principal objetivo en el mantenimiento de todo tipo de estructuras de acero, cables, tuberías, equipo, maquinaria etc. y así prevenir fallas prematuras en la resistencia mecánica o presentación de cada uno de sus componentes.
5. Debe ser de especial interés al tener que evaluar un método de protección, conocer las influencias que el medio ambiente corrosivo ejercerá sobre el objetivo a preservar, así como los esfuerzos a los que estará sometido para elegir de manera eficaz y económica el método adecuado de entre todas las alternativas existentes.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aranda, Agustín. y otros **Corrosión e Incrustación en Tuberías.** (Volumen 2) México: Editorial Universidad Nuevo León, 1967. 678 pp.
2. Burns R. M, W. W. Bradley. **Recubrimientos protectores de los metales** (traducción de José Maria Bermúdez de Castro Y Mosquera) Madrid s.e. 1964. 354pp.
3. Flinn Richard A, Paul K Trojan. **Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones.** Colombia: Editorial McGRAW-HILL Latinoamericana S.A., 1979. 542pp.
4. Guy Albert G., **Metalurgia Física para Ingenieros.** México: Fondo Educativo Interamericano S.A. 1970. 374 pp.
5. Hendrick T. W. **La corrosión y como evitarla.** (Centro Regional de ayuda técnica, Agencia Internacional para el Desarrollo) México: Editorial Santo Domingo Litógrafos, 1966. 78 pp.
6. Orłowski P, J Cauchetier. **Protección por proyección a pistola.** (Edición al español por Eduardo Sanchis López) Barcelona: Editorial José Montesó, 1963. 116pp.
7. Rosales Méndez, Luís Alberto. **Uso de recubrimientos anticorrosivos para la Industria.** Guatemala: Editorial del Ejército. 1981. 50pp.

ANEXOS

ANEXO 1

| CATALIZADOR PARA PRIMARIO ANTICORROSIVO EPOXY | | PIK- 322 | |
|---|--|-------------------------|----------------------|
| DESCRIPCION | Producto formulado exclusivamente para ser mezclado con el primario epoxy PIK 322, para activar su secado | | |
| ACABADO | | COLOR | Transparente lechoso |
| ESPESOR DE LA PELICULA | | CUBRIMIENTO | |
| SÓLIDOS POR VOLUMEN | | SÓLIDOS POR PESO | 48 % |
| VISCOSIDAD | 80-85 KU | PESO POR GALON | 3.5 Kg. |
| PREPARACION DE SUPERFICIE | | | |
| USOS RECOMENDADOS | De uso exclusivo como catalizador PIK 322 | | |
| DILUCIONES | | | |
| TIEMPO DE SECADO | | | |
| VENTAJAS | | | |
| APLICACION | | | |
| INSTRUCCIONES ESPECIALES | A una parte de primario Epoxy 322 agregar una cuarta parte de catalizador, por volumen. Revolver continuamente hasta obtener una mezcla uniforme | | |

Fuente. Carboline, Madrid España

ANEXO 2

| PRIMARIO EPOXICO | | PIK- 322 | |
|----------------------------------|--|-------------------------|-----------------------------|
| DESCRIPCION | Sistema de dos componentes formulados para proveer un fuerte enlace con los sustratos a pintar. Contiene pigmentos anticorrosivos que inhiben la oxidación si se aplica sobre metales. Es una composición de un vehiculo epoxico, cromato de zinc. | | |
| ACABADO | Mate | COLOR | Amarillo |
| ESPESOR DE LA PELICULA | 3.5-5 mils | CUBRIMIENTO | 30-40 m ² /galón |
| SÓLIDOS POR VOLUMEN | 42% | SÓLIDOS POR PESO | 66% |
| VISCOSIDAD | 75-60 KU | PESO POR GALON | 5.7 Kg. |
| PREPARACION DE SUPERFICIE | La superficie debe estar seca, libre de polvo y grasa. La mejor preparación se logra mediante un chorro de arena o Sand Blasting | | |
| USOS RECOMENDADOS | Es un anticorrosivo de uso general, inclusive en piezas sumergidas en el mar. Se suministra en colores verde y amarillo. | | |
| DILUCIONES | Diluyente Epoxico PIK 1040 | | |
| TIEMPO DE SECADO | Seca al tacto en 30 minutos. | | |
| VENTAJAS | Excelente resistencia al impacto y la abrasión. Excelente adhesión, forma excelente enlace con la superficie al pintar. Excelente primario para usar sobre metales a sumergirse en el mar | | |
| APLICACION | Brocha, Pistola, rodillo | | |
| INSTRUCCIONES ESPECIALES | Este producto no debe quedar expuesto. Debe mezclarse un galón de primario epoxico con un cuarto de catalizador para primario epoxico. Mezclar bien y después de una hora comenzar a usarse | | |

Fuente. Carboline, Madrid España

ANEXO 3

| COAL TAR EPOXI | | PIK 192 | |
|----------------------------------|---|-------------------------|-------------------------------------|
| DESCRIPCION | Sistema de dos componentes, especialmente formulado para el mantenimiento pesado de estructuras metálicas en ambientes muy severos y además en condiciones de inmersión, brindado altos espesores de película seca | | |
| ACABADO | SATIN | COLOR | ROJO OSCURO |
| ESPESOR DE LA PELICULA | 5-10 MILS POR MANO | CUBRIMIENTO | 10-12 METROS ² POR GALON |
| SÓLIDOS POR VOLUMEN | 58 | SÓLIDOS POR PESO | 77 % |
| VISCOSIDAD | 100-110 KU | PESO POR GALON | 5.9+0.2 Kg. |
| PREPARACION DE SUPERFICIE | Debe estar limpia y seca. En metal es indispensable eliminar todo rasgo de corrosión con cepillo de acero, lija sand blasting, tipo SSPC 10-6 | | |
| USOS RECOMENDADOS | Para superficies de metal, madera o cemento que estén expuestas a condiciones muy severas o atmósferas químicas. Además utilizado en la impermeabilización de superficies en condiciones de inmersión | | |
| DILUCIONES | No se recomienda. Utilizar el diluyente PIK 1040 para la limpieza de manchas y equipo. | | |
| TIEMPO DE SECADO | Se seca en 12 horas, esperar 24 horas para aplicar una segunda mano | | |
| VENTAJAS | Extraordinaria dureza, así como impermeabilización de superficies. | | |
| APLICACION | Para obtener espesores de película altos, se debe aplicar con brocha o airless. | | |
| INSTRUCCIONES ESPECIALES | Este producto debe ser previamente mezclado con el catalizador coal tar epoxy 191, colocando 4 partes de PIK 191 por volumen y dejar reposar la mezcla 30 minutos antes de aplicarla, se puede utilizar dentro de las 12 horas siguientes. No debe utilizarse para pintar internamente tanques de agua. | | |

Fuente. Carboline, Madrid España

ANEXO 4

| ESMALTE INDUSTRIAL ANTIHONGO | | PIK- 212 | |
|----------------------------------|---|-------------------------|------------------------------|
| DESCRIPCION | Es un esmalte a base de resinas- alkydalicas modificadas. Tiene una excelente adhesión, gran durabilidad, alta flexibilidad, retención de brillo y contiene un tipo de fungicida especial que lo hace altamente resistente a los hongos | | |
| ACABADO | Brillante 90-95 (60) | COLOR | Blanco |
| ESPESOR DE LA PELICULA | 1.5 mills | CUBRIMIENTO | 45.5 m ² a 1 mill |
| SÓLIDOS POR VOLUMEN | 42 | SÓLIDOS POR PESO | 59 |
| VISCOSIDAD | 75-80 ku | PESO POR GALON | 4.4 Kg. |
| PREPARACION DE SUPERFICIE | Toda superficie debe estar seca, libre de polvo y grasa | | |
| USOS RECOMENDADOS | Ideal para el pintado de equipo, maquinaria, estructuras y casas en contacto con atmósfera altamente propensa a la formación de hongos | | |
| DILUCIONES | No se recomienda. Para aseo personal, material de trabajo y limpieza de manchas utilizar PIK- 1001 | | |
| TIEMPO DE SECADO | 4 a 5 horas. Aplicar segunda capa después de 8 horas | | |
| VENTAJAS | Secamiento rápido. Acabado altamente brillante y duro. Alta resistencia a la formación de hongos. Fácil de aplicar con brocha o pistola. Muy resistente y flexible. Amplia gama de colores | | |
| APLICACION | Brocha, Pistola y rodillo | | |
| INSTRUCCIONES ESPECIALES | En superficies de metal siempre debe usarse una primera capa de anticorrosivo del tipo Pik 101, PIK 121 o PIK- 161 | | |

Fuente. Carboline, Madrid España

ANEXO 5

| COAL TAR EPOXY ZINC | | PIK- 153 | |
|----------------------------------|--|-------------------------|---------------------------|
| DESCRIPCION | Es una formula de tres componentes que combina las excelentes propiedades de la brea, la gran resistencia química de las resinas epóxicas y el efectivo poder anticorrosivo del pigmento del zinc. El producto resultante es un primario muy resistente, flexible y de una durabilidad prolongada. Protege contra la corrosión de vapores, salpicaduras, derrame de ácidos, álcalis y soluciones salinas | | |
| ACABADO | Mate | COLOR | Negro |
| ESPESOR DE LA PELICULA | 3 mills | CUBRIMIENTO | 20 m ² / galón |
| SÓLIDOS POR VOLUMEN | 46 % | SÓLIDOS POR PESO | 70 % |
| VISCOSIDAD | 100 KU | PESO POR GALON | 22 lb. |
| PREPARACION DE SUPERFICIE | La superficie debe estar seca, limpia, libre de polvo y grasa | | |
| USOS RECOMENDADOS | Se usa en superficies interiores y exteriores. En superficies de hierro y acero en general. Excelente adhesión sobre metal galvanizado. Puede usarse el Coal Tar Epóxico como capa final para uso marino en general. Se recomienda para interiores de tanques de refinería | | |
| DILUCIONES | Diluyente Epóxico (pik 1040) | | |
| TIEMPO DE SECADO | 3 Horas. 2da. Capa de aplicación después de 8 horas | | |
| VENTAJAS | Fácil aplicación Efectiva protección de metal estacionado en ambientes altamente corrosivos y en superficies enterradas, sumergidas y/o subacuáticas. Secado Rápido | | |
| APLICACION | Brocha, Pistoía, Airless | | |
| INSTRUCCIONES ESPECIALES | A un galón base epóxica Coal Tar agregar una parte (1:1 por volumen) del catalizador, mezclar bien y dejar reposar por 1 hora. Agregar luego lentamente luego el contenido de la lata de polvo de zinc. Revolver hasta homogenizar. Gasolina y otros solventes pueden descolorar el producto pero no cambia sus propiedades | | |

Fuente. Carboline, Madrid España

ANEXO 6

| CATALIZADOR PARA COAL TAR EPOXY | | PIK 191 | |
|----------------------------------|--|-------------------------|--------------|
| DESCRIPCION | Formulado exclusivamente para ser mezclado con el coar tar epoxy | | |
| ACABADO | | COLOR | Transparente |
| ESPESOR DE LA PELICULA | | CUBRIMIENTO | |
| SÓLIDOS POR VOLUMEN | 67 | SÓLIDOS POR PESO | 74 % |
| VISCOSIDAD | 7000-1200 cps | PESO POR GALON | 4 Kg./galón |
| PREPARACION DE SUPERFICIE | | | |
| USOS RECOMENDADOS | Este producto no puede usarse por si solo. Debe mezclarse con el Coal Tar Epoxy | | |
| DILUCIONES | | | |
| TIEMPO DE SECADO | | | |
| VENTAJAS | | | |
| APLICACION | | | |
| INSTRUCCIONES ESPECIALES | A cuatro partes de Coal Tar Epoxy PIK 190 agregar una parte de catalizador Coal Tar Epoxy PIK 191. Revolver bien hasta obtener una mezcla uniforme | | |

Fuente. Carboline, Madrid España