

MANUAL ECOMAR DE  
CORROSION Y PROTECCION

SENID

SERVICIO NAVAL DE INVESTIGACION Y DESARROLLO

Buenos Aires - 1981

## INDICE

PREFACIO ( <i>Capitán de Navío R. Nasta, SENID</i> ).....	1
FUNDAMENTOS DE LOS PROCESOS DE CORROSION ( <i>A. J. Arvía y J. J. Podestá, INIFTA</i> ).....	1
CONTROL DE LA CORROSION ( <i>A. J. Arvía y J. J. Podestá, INIFTA</i> ).....	5
ATAQUE LOCALIZADO ( <i>J. R. Galvele, CNEA</i> ).....	27
ALEACIONES RESISTENTES A LA CORROSION ( <i>C. J. Semino y J. R. Galvele, CNEA</i> ).....	41
CORROSION MICROBIOLOGICA ( <i>B. R. de Meybaum, CITEFA</i> )..	47
ACCION DE LAS INCRUSTACIONES BIOLÓGICAS O FOULING ( <i>R. Bastida y V. Lichtschein de Bastida, INIDEP</i> ).....	63
PINTURAS ( <i>V. Rascio, CIDEPINT</i> ).....	77
PINTURAS ANTICORROSIVAS ( <i>V. Rascio y C. A. Giudice, CIDEPINT</i> ).....	89
PINTURAS ANTIINCRUSTANTES ( <i>V. Rascio, CIDEPINT</i> ).....	93
PREPARACION DE SUPERFICIES ( <i>J. J. Caprari y V. Rascio, CIDEPINT</i> ).....	103
APLICACION DE PINTURAS ( <i>J. J. Caprari y V. Rascio, CIDEPINT</i> ).....	119
RECUBRIMIENTOS DE PROTECCION TEMPORARIA ( <i>J. J. Caprari, CIDEPINT</i> ).....	133
ELECCION DE COLORES ( <i>V. Rascio, CIDEPINT</i> ).....	137

## PREFACIO

La mayor parte de los metales utilizables industrialmente sufren fenómenos de corrosión, es decir se deterioran o destruyen por la acción de medios agresivos de diferentes características. En la Armada existe una larga experiencia en la lucha contra la corrosión, por la agresividad del ambiente marino sobre los componentes estructurales de las unidades.

Para cuantificar la importancia de este problema sería necesaria una referencia económica concreta y ésta es difícil de establecer, por cuanto además de las pérdidas directas, que se refieren al valor de los materiales destruidos, hay una inmensa variedad de pérdidas indirectas, de difícil análisis. Entre estas últimas pueden citarse las siguientes: vidas humanas por accidentes catastróficos de los materiales estructurales, paralización del uso de sistemas por reparación, pérdida o contaminación de productos intermedios o finales, aumento de consumo de energía, disminución de rendimiento como consecuencia de la modificación de las características hidrodinámicas de un buque por acumulación de productos de corrosión e incrustaciones.

Es por estos motivos que la Armada Argentina, a través del Servicio Naval de Investigación y Desarrollo, decidió oportunamente apoyar las tareas de investigación que realizaban científicos de diferentes organismos (CNEA, CITEFA, INIFTA, CIDEPINT), brindando su aporte en forma de subsidios para que se efectivizara el PROGRAMA ECOMAR, interinstitucional y multidisciplinario. Se orientaron así aquellos esfuerzos al estudio de la corrosión marina y su control.

Hace más de un lustro que se está trabajando en el tema y son numerosas las publicaciones científicas y asesoramientos ya realizados. Muchos de los trabajos efectuados han sido presentados en reuniones científicas nacionales e internacionales. Además, en el año 1973, se publicó un tomo sobre CORROSION MARINA, donde estos problemas fueron analizados exhaustivamente.

Complementando esta tarea de transferencia de conocimientos, el SENID ha encarado la edición de este MANUAL ECOMAR DE CORROSION Y PROTECCION, donde se consideran casos de interés práctico y se procura, mediante un lenguaje sencillo, llegar al mayor número posible de interesados en el tema.

Capitán de Navío Rubén Nasta  
Jefe del SENID

# FUNDAMENTOS DE LOS PROCESOS DE CORROSION

## DEFINICION DE CORROSION

Se denomina con el término general de corrosión a la alteración de los materiales provocada por el medio que los rodea. Cuando se trata de metales, se habla de *corrosión metálica*. De acuerdo a la naturaleza del *medio corrosivo* la corrosión metálica comprende la *corrosión química* y la *corrosión electroquímica*.

La *corrosión química* abarca el ataque por sistemas *no electrolíticos*, tales como gases y vapores a temperaturas que impiden su condensación sobre la superficie metálica (la corrosión en hornos, en motores de combustión interna, en turbinas de gases y vapor, la oxidación de metales por calentamiento), o por líquidos no conductores de la corriente eléctrica (solventes de naturaleza orgánica con sustancias disueltas con propiedades agresivas, tales como benceno con bromo disuelto, alcohol metílico con yodo disuelto, etc.).

La *corrosión electroquímica* comprende a la corrosión atmosférica en aire húmedo, a la producida en suelos, a la corrosión provocada por medios electrolíticos (agua de mar, soluciones de ácidos, sales y álcalis) y por sales fundidas (criolita-alúmina, escorias, etc.).

Los medios que producen corrosión electroquímica se caracterizan por su *conducción iónica*. Tal es el caso de los ambientes marinos que son de especial interés en este manual, cuyo principal objetivo es presentar la corrosión metálica desde el punto de vista de la corrosión electroquímica.

## CELDA GALVANICA O PILA DE CORROSION

La corrosión electroquímica está relacionada con una *celda galvánica* o pila de corrosión. Esta última está formada por: un *ánodo*, un *cátodo* y una *solución conductora* de la corriente eléctrica (figura 1).

En forma simple, cuando la pila funciona (corto circuito) el



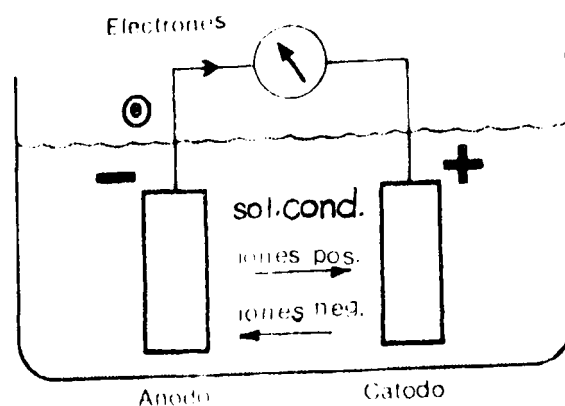


Fig. 1.- Celda unitaria de corrosión

metal que se corroe constituye el ánodo, la solución electrolítica es el medio corrosivo y el cátodo (parte de la misma superficie de metal o de otra superficie metálica en contacto con ella) constituye el otro electrodo en la celda.

El metal que forma el ánodo se corroe, pasa a la solución conductora (electrolito) como iones cargados positivamente (cationes). Los electrones libres circulan a través del conductor externo y participan en la reacción que ocurre sobre el cátodo. Por lo tanto, la corrosión está asociada con una corriente que circula entre el ánodo y el cátodo debida al flujo de electrones en los conductores metálicos y al movimiento de iones dentro de la solución conductora. En la fig. 1 las flechas indican la dirección de circulación de las cargas negativas (electrones en el metal y aniones en la solución). Cuando toda la superficie de un metal es el ánodo y la del otro metal ligado a la celda galvánica es el cátodo, se establece una *celda de corrosión galvánica*. Esta macrocelda de corrosión se puede producir, por ejemplo, con el casco y la hélice de una embarcación en el mar. Las más frecuentes e importantes son, sin embargo, las celdas de corrosión formadas por un gran número de pequeñas interconectadas (*micropilas*), localizadas en distintos puntos de la superficie del metal (figura 2).

Los ánodos y cátodos locales pueden aparecer por diferencias entre las fases que constituyen el metal, por inhomogeneidades de los revestimientos protectores o por modificaciones locales en la solución conductora (*aireación diferencial*).

El medio corrosivo (electrolito) puede presentarse masivamente como el agua de mar o constituir una fina película condensada o retenida sobre la superficie del metal. En cualquier caso la velocidad de la corrosión está influenciada por la resistencia eléctrica del electrolito. Cuando la resistencia eléctrica es

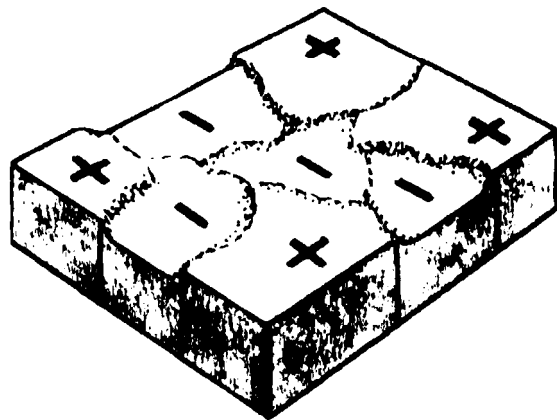


Fig. 2.- Microceldas de corrosión

grande (medios poco conductores), por ejemplo, agua pura, la velocidad de corrosión es baja y viceversa, cuando es baja (medios buenos conductores), por ejemplo soluciones de sales, ácidos y bases, aquélla es alta.

Las reacciones generales que ocurren en una celda de corrosión típica electroquímica en medios acuosos con oxígeno disuelto por contacto a la atmósfera se esquematizan en el diagrama de la figura 3, para una solución neutra.

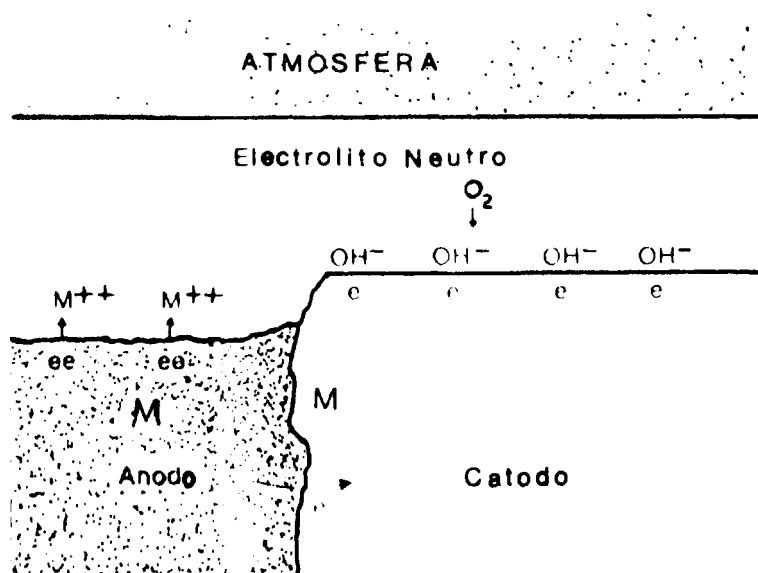


Fig. 3.- Disolución anódica del metal M complementada por la reacción catódica de reducción de oxígeno

La zona catódica es donde el oxígeno ( $O_2$ ) disuelto en el medio corrosivo se reduce a aniones hidroxilo ( $OH^-$ ) y la zona anó-

dica donde ocurre la disolución electroquímica del metal (M) pasando a formar cationes metálicos ( $M^{++}$ ) en el medio corrosivo.

Dado que el propósito del presente manual es el de dar mayor información con referencia a los métodos de control de la corrosión, se indican a continuación las bases generales para mitigar la velocidad del proceso de corrosión.

# CONTROL DE LA CORROSION

## SELECCION DE LOS MATERIALES

La selección de los materiales a emplearse en diferentes medios corrosivos se realiza teniendo en cuenta sus propiedades (mecánicas, físicas, resistencia a la corrosión, soldabilidad, etc.), el aspecto económico y los requerimientos de servicio. En este sentido muchas veces conviene elegir un material más barato con menor resistencia a la corrosión pero que pueda reemplazarse de acuerdo a un mantenimiento programado, frente a otro más resistente pero de alto costo. El mismo criterio es aplicable a la selección de revestimientos protectores.

## DISEÑO

El diseño y la correspondiente homogeneidad de los materiales juegan un papel importante para evitar o frenar la corrosión. Todo tipo de *grietas* o *hendiduras* donde pueda quedar retenido el medio corrosivo, como así también *uniones de metales disímiles*, aparición de *gradientes térmicos* sobre un material en uso, etc., pueden disminuir apreciablemente su vida útil.

En las figuras 4 y 5 se esquematizan ejemplos de diseños no adecuados para el control de la corrosión, juntamente con las soluciones más sencillas para cada caso.

Así por ejemplo se tiene:

- a) Los tanques de almacenamiento deben diseñarse permitiendo un completo drenaje de su contenido.
- b) Evitar la acumulación del medio corrosivo, tanto por drenaje por simple orificio o por inversión de la armadura.
- c, d) Las hendiduras inevitables serán rellenadas para evitar retención de líquido.
- e) Las zonas de acceso con diferentes espacios (t) serán adecuadas para permitir el tratamiento por recubrimientos protectores.
- f) Las columnas de acero se protegen al nivel del suelo con

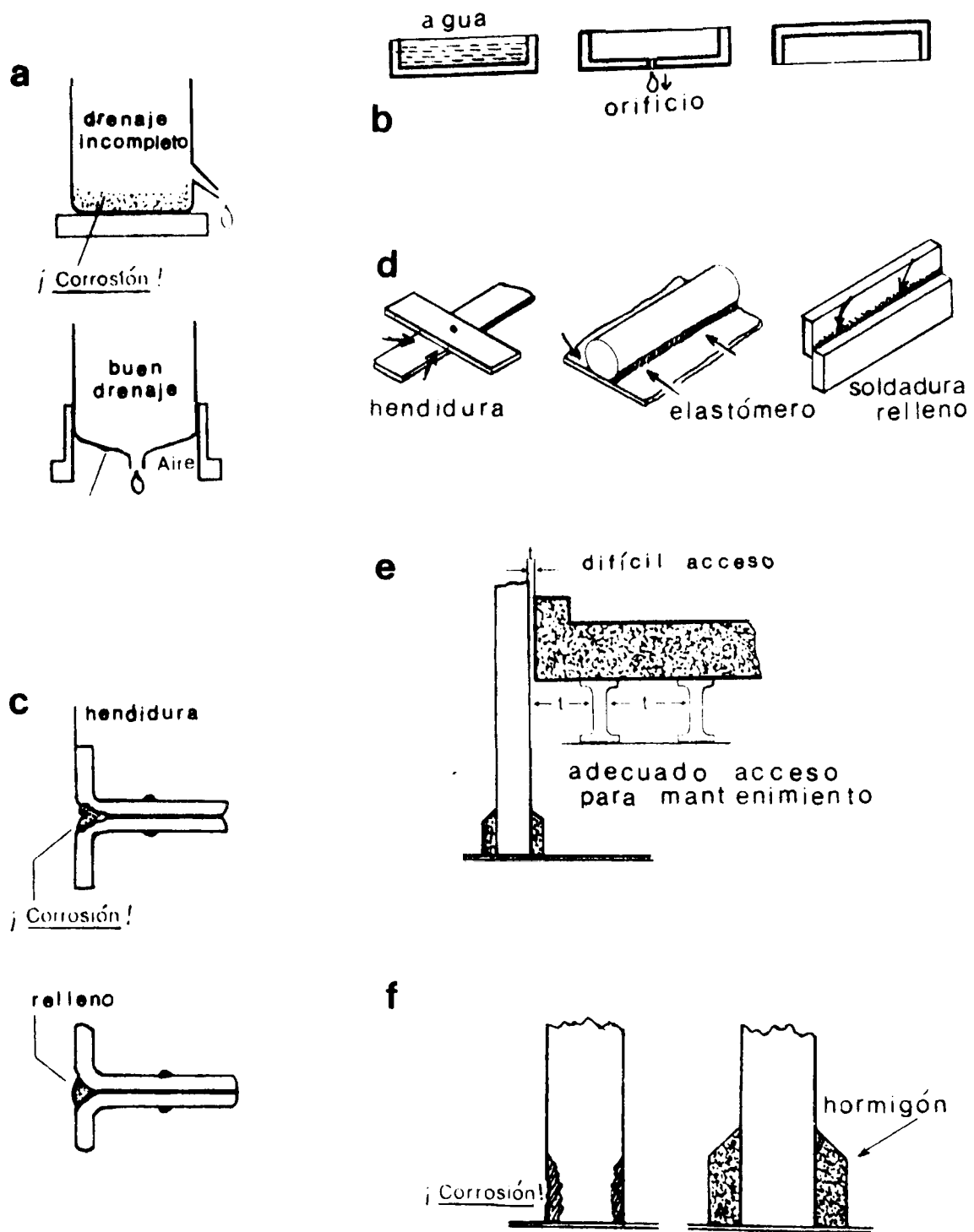


Figura 4

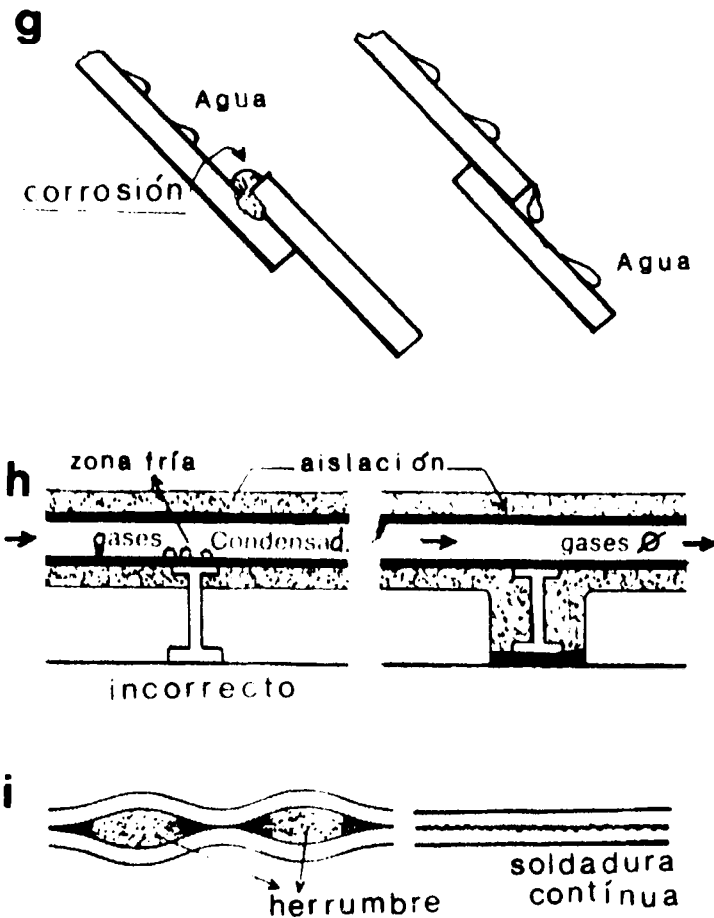


Figura 5

cubierta de cemento.

- g) Las juntas por solapaduras se hacen evitando la acumulación de agua.
- h) Una adecuada aislación impide la condensación de gases y vapores con propiedades corrosivas.
- i) Asegurar la continuidad de una soldadura.

El fenómeno de corrosión por aireación diferencial se esquematiza en la figura 6. El oxígeno disuelto en la gota de agua depositada sobre el acero está inicialmente uniformemente distribuido (a) pero a medida que es lentamente consumido por la reacción catódica se produce un gradiente de su concentración en la fase líquida (b). La reposición de oxígeno desde el aire es más rápida en los bordes de la gota que en su centro.

Consecuentemente la reacción catódica ocurre predominantemente en la periferia de la gota y la disolución del metal en el cen-

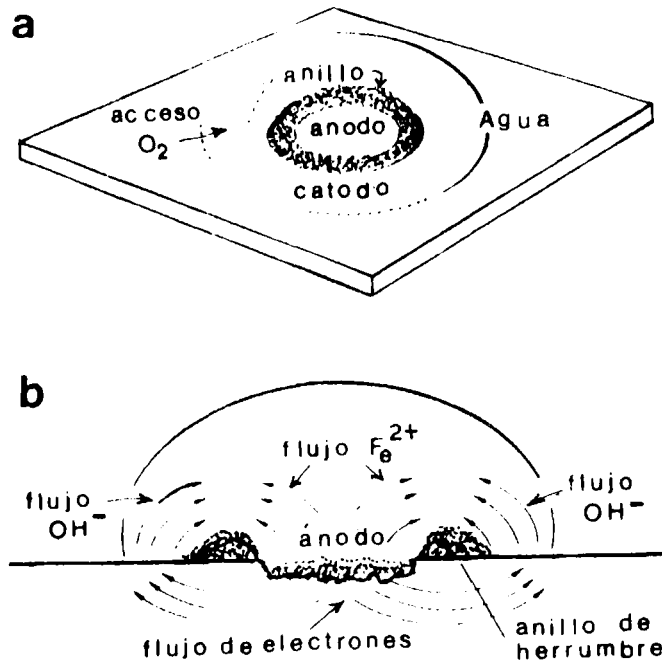


Figura 6.- Distribución secundaria de áreas anódicas y catódicas sobre el acero (a) y corrosión del acero bajo una gota de agua (b)

tro de la misma.

La alta concentración de iones hidroxilo ( $\text{OH}^-$ ) precipita a los iones ferroso produciendo finalmente la formación de herrumbre.

La figura 6 b esquematiza el movimiento de los electrones

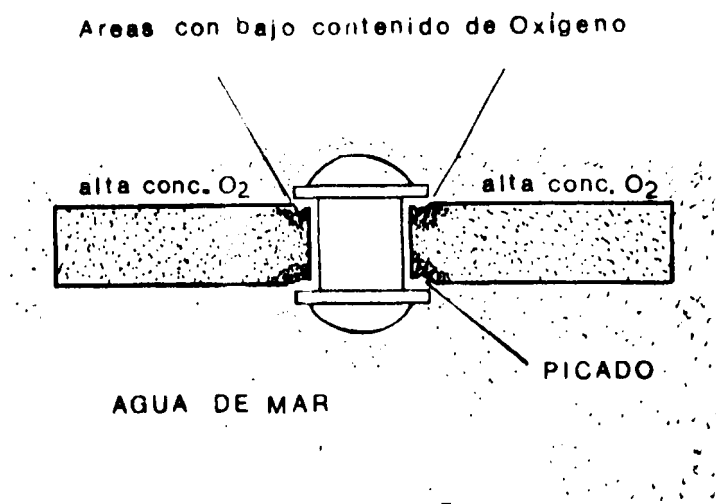


Fig. 7.- Corrosión por hendidura provocada por aireación diferencial

y de los iones durante el proceso de corrosión.

En la figura 7 se ejemplifica el picado de un componente metálico por agua de mar.

Los óxidos superficiales presentes en metales como el hierro presentan defectos, a través de los cuales se expone el metal al medio agresivo.

La película de óxido actúa como cátodo y la zona no cubierta como ánodo, ocurriendo la disolución localizada del hierro bajo la forma de picadura ("pit"). La formación de herrumbre sigue el mismo proceso ya descrito (figura 8).

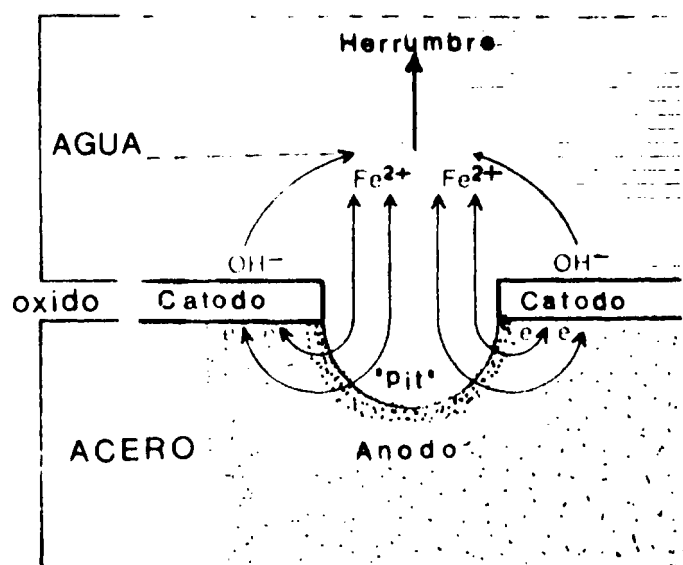


Fig. 8.- Corrosión asociada con defectos en la superficie

## POSIBLES MATERIALES

Una forma de evitar la corrosión es emplear materiales químicamente resistentes, tales como plásticos, cerámicos, vidrios, gomas, amianto y cemento. Sin embargo, estos materiales en muchos casos no tienen las propiedades requeridas para satisfacer las condiciones de servicio. Entonces, por razones mecánicas, un metal resulta la única elección posible.

La resistencia a la corrosión de los diferentes metales cambia mucho. Así, los metales nobles (oro, platino) son intrínsecamente resistentes a la mayoría de los medios corrosivos; el



cromo y el titanio poseen buena resistencia, mientras que el acero, cinc y magnesio son fácilmente corroibles. El buen comportamiento a la corrosión de un metal o aleación depende de su posición en la *serie electroquímica* y de las características de adherencia, morfología y propiedad de reformación de la película que se genera espontáneamente sobre la superficie cuando está en contacto con el aire o con un medio corrosivo. Cuando esta película protectora es estable el material tiende a comportarse como uno noble.

La *estabilidad de la película protectora* requiere una cantidad suficiente de oxígeno en el medio corrosivo para asegurar su reparación frente a posibles defectos de la misma. Cuando esto no ocurre (medio corrosivo no oxidante) la película protectora se puede romper exponiendo el metal subyacente al ataque (*corrosión por hendidura*).

Sobre la base de estos hechos, el acero al carbono es el material metálico más barato acorde con las demandas de aplicación y por este motivo es el más usado. La incorporación al acero de *aleantes* (cromo, níquel) lleva a los *aceros inoxidable*s, que son, en general, materiales muy resistentes a la corrosión en determinados medios agresivos.

El cromo, aluminio, titanio, silicio, tungsteno (wolframio) y molibdeno forman películas de óxido protectoras. Los tres últimos generan óxidos ácidos particularmente resistentes a los medios fuertemente ácidos. Sus aleaciones son altamente resistentes a distintos medios corrosivos.

El níquel forma aleación resistente a la corrosión ácida aún en sistemas con bajo contenido de oxígeno. Existen diversas aleaciones para hacer frente a la mayoría de los medios corrosivos, pero, en muchos casos su precio es tan elevado que no resulta conveniente su empleo.

A continuación se mencionan algunas *aleaciones comunes* "intrínsecamente" resistentes a la corrosión.

#### 1. ACEROS INOXIDABLES

Hay tres tipos principales: los *martensíticos* y *ferríticos* que contienen 11-18 por ciento de cromo y los *austeníticos* con 17-26 por ciento de cromo y 8-22 por ciento de níquel. La resistencia a la corrosión es en general mayor para los aceros del tipo austenítico. Los aceros inoxidables son más efectivos en medios totalmente alreados u oxidantes donde se asegura el mantenimiento de la película pasivante protectora. Sin embargo pueden sufrir procesos de corrosión localizada por picado, por hendidura y corrosión fisurante, según el medio agresivo de que se

ACTIVOS



Magnesio

Cinc

Aluminio (comercial)

Cadmio

Duraluminio (aluminio con 4,5 % de cobre)

Aceros

Hierro fundido

Acero inoxidable (tipo 430, 18 % de cromo)

Acero inoxidable (tipo 304, 18 % de cromo,  
10 % de níquel)

Aleación plomo-estaño

Plomo

Estaño

Níquel

Latones

Cobres

Bronces

Monel (cobre 70 %, níquel 30 %)

Plata

Titanio

Grafito

Oro

Platino

NOBLES

Tabla 1.- Serie galvánica de metales en agua de mar

trate. En general son resistentes a la corrosión atmosférica, al ácido nítrico, al ácido sulfúrico en un rango de concentraciones, a los ácidos orgánicos, etc.

## 2. ALEACIONES DE COBRE

El cobre resiste al agua de mar, al agua dulce tanto fría como caliente, a los medios ácidos no afreados y al ataque atmosférico. La adición de aleantes mejora sus propiedades mecánicas y físicas y también su resistencia a la corrosión. Por ejemplo el empleo de los latones con aluminio y las aleaciones cupro-níquel como tubos de condensadores y las variedades de bronces para componentes de bombas impulsoras, hélices de embarcaciones, etc.

## 3. ALEACIONES DE ALUMINIO

El aluminio ofrece buena resistencia a la corrosión atmosférica y a muchos otros medios agresivos (ácidos grasos, acético, cítrico, sulfuroso). Aleado con pequeñas cantidades de otros metales mejora sus propiedades mecánicas y físicas. Las aleaciones de aluminio-magnesio, de aluminio-manganeso y de aluminio-magnesio-silicio presentan buena resistencia a la corrosión. Las que contienen cobre son las menos resistentes, pero enchapadas con aluminio mejoran esta propiedad.

## 4. ALEACIONES DE NIQUEL

El níquel resiste la corrosión atmosférica, la acción de soluciones alcalinas tanto en frío como en caliente, a los ácidos orgánicos e inorgánicos diluidos no oxidantes. El cobre mejora su resistencia frente a medios reductores y al picado por agua de mar. El cromo mejora su comportamiento en condiciones oxidantes y el molibdeno, en medios reductores.

## 5. ALEACIONES DE TITANIO

El titanio puro y sus aleaciones exhiben una alta resistencia a la corrosión en agua de mar y en atmósferas industriales. El titanio conocido como CP (pureza comercial) puede presentar distintas características mecánicas debido a impurezas de elementos tales como oxígeno, nitrógeno y carbono. Sin embargo estos elementos no afectan su resistencia a la corrosión. Las dos aleaciones más importantes resistentes a la corrosión por hendidura son Ti/Ni/Mo y Ti/0,15 % Pd. La soldadura del titanio debe realizarse en atmósfera inerte de gas argón purificado; el oxígeno, en pequeñas cantidades y por encima de 600°C difunde en el metal y aumenta su dureza, con la consiguiente fragilización.

## COMO SE FRENA LA CORROSION

Todo aquello que conduzca a la disminución del flujo de corriente eléctrica en la celda de corrosión, por aumento de su resistencia, llevará a una disminución de la velocidad del proceso de corrosión. En base a ello la corrosión se puede controlar imponiendo una corriente eléctrica al metal que se corroe para hacerlo cátodo con respecto a un electrodo externo que resulta ser el nuevo ánodo del sistema (*protección catódica*). Otra alternativa es elevar el potencial del metal que se corroe a un valor suficientemente alto para que se pasive (*protección anódica*). Los métodos de control de corrosión utilizan una de las dos alternativas.

Los tres métodos principales para mitigar la corrosión metálica son: modificación del medio agresivo, aplicación de métodos eléctricos de control y empleo de revestimientos protectores.

## CONTROL DE CORROSION MODIFICANDO EL MEDIO

Los medios corrosivos se pueden agrupar en tres: aguas, atmósfera y suelos.

### AGUAS

El agua que entra en contacto con un metal proviene en general del agua de mar o de lluvia. Su composición química puede variar ampliamente de acuerdo al grado de contaminación originada por descarga de los ríos, siendo importante el contenido de oxígeno disuelto. De acuerdo con su contenido de calcio, un agua se clasifica en *agua dura* (200-500 ppm de carbonato de calcio) y en *agua blanda* (10-50 ppm de carbonato de calcio). Para el uso industrial, las aguas duras deben tratarse a fin de eliminar su dureza y evitar la formación de incrustaciones, particularmente en tubos de calderas e intercambiadores de calor. Es importante señalar que muchas veces, la corrosión es menor debido a la presencia de incrustaciones calcáreas controladas.

### *Métodos de control*

El principal método de tratamiento de aguas desde el punto de vista de la corrosión metálica, es mediante la eliminación del oxígeno disuelto y la adición de inhibidores. El hierro y los aceros al carbono son los materiales de construcción más co-

munes y su corrosión por aguas es, por lo tanto, particularmente importante.

La velocidad de corrosión del acero no aleado está generalmente gobernada por la electroreducción del oxígeno disuelto en el medio acuoso. En aguas neutras o alcalinas, libres de oxígeno, la corrosión es generalmente insignificante. La presencia de oxígeno acelera la reacción catódica y consecuentemente la velocidad de la corrosión aumenta en proporción a la cantidad de oxígeno disponible.

En aguas ácidas ( $\text{pH} < 4$ ), la corrosión puede ocurrir aún en ausencia de oxígeno, puesto que en estas condiciones la reacción de descarga de hidrógeno es la reacción catódica en la pila de corrosión. En la mayoría de los casos el pH del agua está determinado por la presencia de anhídrido carbónico (dióxido de carbono) disuelto proveniente del aire (0,03 % en volumen). Este lleva el pH del agua a la región ácida.

#### *Remoción de gases disueltos*

La eliminación previa del oxígeno y del dióxido de carbono disuelto en el agua es, por lo tanto, importante para frenar la corrosión del hierro y aceros, del cobre y sus aleaciones, del cinc y del plomo. El oxígeno gaseoso puede eliminarse *físicamente* (trabajando a bajas presiones, por aumento de temperatura o por purga con un gas inerte) o *químicamente* (por tratamiento con soluciones de sulfito de sodio o con hidrazina).

#### *Inhibidores*

Los inhibidores se usan para modificar, en circuito cerrado, las propiedades agresivas de las aguas. Actúan por bloqueo de los centros activos a la corrosión (adsorción) o químicamente. Se emplean dentro de un rango de bajas concentraciones. Por ejemplo en sistemas de enfriamiento, motores de combustión interna, rectificadores, torres de enfriamiento y en aguas de alimentación de calderas.

Hay *inhibidores anódicos* (hidróxido de sodio, carbonato de sodio, nitrito de sodio, silicato de sodio, tetraborato de sodio, ciertos fosfatos, cromato de sodio y benzoato de sodio) e *inhibidores catódicos* (sulfato de cinc, sulfato de magnesio y bicarbonato de calcio)

Los dos tipos de inhibidores se pueden emplear combinados. Los inhibidores anódicos actúan por precipitación de un compuesto (óxido férrico hidratado) en los sitios de corrosión. Se reduce así la velocidad de corrosión. Los inhibidores catódicos actúan sobre la superficie total del acero y son menos eficientes. Estos últimos forman productos adherentes con alta resistencia eléctrica.

La desventaja de algunos inhibidores anódicos es que, aunque diluidos, deben exceder una *concentración límite* para asegurar que cada defecto posible en la película esté bloqueado por el inhibidor. Si su concentración está por debajo de la concentración límite se produce un aumento de la velocidad de corrosión con un picado profundo.

Este riesgo se puede reducir con el empleo de los *inhibidores sinérgicos*, basados en mezclas de inhibidores anódicos y catódicos. En los inhibidores sinérgicos (por ejemplo cromato-polifosfato-cinc) el componente catódico disminuye la velocidad de corrosión permitiendo así que el componente anódico selle la película a concentraciones menores que la concentración límite.

En medios corrosivos ácidos que disuelven la película protectora de óxido formada sobre el hierro y los aceros, los inhibidores con carácter pasivante obviamente no tienen efecto. En estos casos se usan *inhibidores que actúan por adsorción*, tales como moléculas orgánicas con grupos funcionales selectivos.

Los inhibidores de la corrosión por adsorción actúan tanto en el proceso anódico como en el catódico. Su uso adecuado exige un estudio cuidadoso previo a su empleo.

## LA ATMOSFERA

La *corrosión atmosférica* de metales incluye su ataque en la intemperie y en el interior tanto de edificios como de equipos y maquinarias. El proceso de corrosión depende de los contaminantes presentes en el aire y de la humedad relativa ambiente.

### *Contaminantes*

La *calidad de la atmósfera* de cada área industrial, urbana, rural o marina, varía con la hora del día y con las estaciones. Así, cerca de costas de mar contiene sales marinas, en regiones industriales incluye cantidades apreciables de carbono (hollín), monóxido y dióxido de carbono, anhídrido sulfuroso y sulfúrico, menores cantidades de ácido sulfhídrico, dióxido de nitrógeno, amoníaco y variadas sales en suspensión.

El *anhídrido sulfuroso* ( $SO_2$ ) que es convertido en ácido sulfúrico es el principal acelerador de la corrosión atmosférica. Las *partículas de polvo* en conjunción con la humedad forman celdas de corrosión por aireación diferencial en la superficie. También a través de la absorción de  $SO_2$  aceleran la corrosión en la zona de contacto con el metal.

Los vapores de *ácidos orgánicos* de tipo alifático (fórmico,

acético, propiónico, etc.) originados por degradación de algunas maderas, plásticos, gomas y pinturas son otra fuente de corrosión atmosférica. En atmósferas húmedas, concentraciones de aquellos tan bajas como 0,1 partes por millón resultan agresivas para algunos metales. Pero afortunadamente la llamada "*corrosión por vapor*" se encuentra sólo en atmósferas confinadas (interior de equipos y envoltorios de embalaje, etc.).

### *Humedad*

La *humedad relativa* es importante en el grado de la corrosión atmosférica. El hierro desnudo no se corroe en zonas urbanas ni industriales con una humedad relativa ambiente menor que 70 por ciento. La *humedad crítica* está asociada con la naturaleza higroscópica del sólido contaminante presente como la de los productos de corrosión. Sus valores oscilan entre el 50 al 70 por ciento para el acero, cobre, níquel y cinc.

La exposición directa o el resguardo de la lluvia puede ser beneficiosa o perjudicial. El agua de lluvia puede lixiviar inhibidores solubles de revestimientos protectores como también productos de corrosión con características similares.

### *Métodos de control*

La forma más efectiva de disminuir la corrosión atmosférica es a través de la *eliminación de las sustancias agresivas* y en especial el dióxido de azufre ( $SO_2$ ). Como esto es imposible de realizar en equipos y estructuras ubicadas en zonas industriales se requiere, por lo tanto, técnicas de protección. Para interiores, el aire acondicionado continuamente mantenido puede asegurar una atmósfera filtrada, limpia y seca con humedad relativa baja, pero su interrupción (por ejemplo durante la noche) puede causar condensación de agua con la consiguiente iniciación de la corrosión.

También deberá recordarse que un material resistente al ataque de un determinado tipo de atmósfera no necesariamente será resistente a otra. Existen variados tipos de recubrimientos para proteger especialmente al acero de la corrosión atmosférica. Por otra parte también hay metales y aleaciones que son altamente resistentes. Así los aceros inoxidable y el aluminio, que tienen buena resistencia a la corrosión en atmósferas industriales, urbanas y rurales, no lo son en las marinas.

Pequeñas cantidades de *aleantes* como cobre, fósforo, níquel y cromo incorporados al acero aumentan considerablemente su resistencia a la corrosión atmosférica. Algunos aceros de este tipo son los llamados "*autopasivables*" por formar con el medio pe-

lículas protectoras, adherentes, de composición compleja. No requieren por lo tanto recubrimientos por pintado. Se emplean en la construcción de puentes, estructuras para edificios, etc., pero no en interiores ya que al abrigo de ciertos componentes atmosféricos no forman dichas películas pasivantes.

Para proteger al acero descubierto en lugares inaccesibles (embalajes, componentes internos de maquinarias, etc.) se usan *inhibidores de corrosión volátiles* o en *fase vapor*. Los más comunes son el carbonato de ciclohexilamina (con gran poder inhibidor, pero de bajo tiempo de protección por su alta tensión de vapor) y el nitrito de dicitclohexilamina. Estos compuestos actúan por evaporación lenta, depositándose sobre la pieza de acero como una película protectora. Sin embargo algunos de ellos corroen a estos metales (cobre, cinc y cadmio) que pueden estar junto al acero. Su acción es efectiva si los envoltorios están sellados adecuadamente, si los componentes metálicos no se encuentran inicialmente corroídos y si la presión parcial del inhibidor volátil es suficiente.

## SUELOS

Las características de la *corrosión por suelos* se asemejan a las de la corrosión por aguas, debido a las sustancias disueltas que contiene el suelo. La magnitud de la corrosión dependerá entonces de la composición del suelo y como en el caso de la corrosión atmosférica, un metal enterrado actúa protegido en ciertas zonas pero puede corroerse en otras.

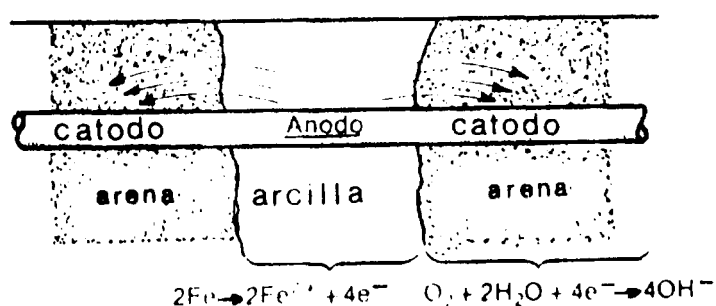


Figura 9.- Corrosión por aireación diferencial producida por suelos de distinta composición

En este tipo de corrosión influyen la humedad, el acceso de oxígeno (aireación), la conductividad eléctrica (presencia de sales disueltas) y el pH del suelo.

En general, en estructuras de acero enterradas la corrosión por formación de celdas de concentración de oxígeno es muy



importante.

La corrosión necesita, por lo tanto, un medio permeable al aire. Una excepción importante es el ataque al que están sujetos el hierro y acero en arcillas neutras anegadas, en las que el acceso de oxígeno del aire está frenado por la propia naturaleza del suelo (figura 9).

La corrosión en este caso está gobernada por la reacción catódica. Esta se produce por la presencia en el suelo, de bacterias anaeróbicas reductoras de sulfato.

Muchas veces los materiales enterrados también se corroen por las corrientes parásitas originadas por instalaciones eléctricas cercanas (figura 10). En este caso el metal enterrado

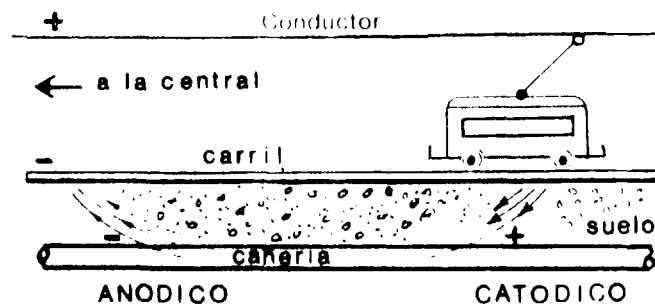


Figura 10.- Corrosión de una cañería enterrada causada por corrientes parásitas

conduce la corriente eléctrica parásita pues es el camino de mínima resistencia. Entonces el metal enterrado actúa como cátodo en el lugar donde la corriente positiva entra al metal y como ánodo, donde sale. Este fenómeno es comparable al producido en la industria naval cuando se usan máquinas de soldadura eléctrica con cascos sumergidos y una conexión a tierra inadecuada. Estos efectos se agravan cuando se trata de fuentes de corriente continua, pero aun con corriente alterna se puede producir un efecto similar por la rectificación de la misma dado el carácter semiconductor de algunos óxidos superficiales en los metales.

Como métodos de control se pueden indicar los siguientes: para suelos ácidos es común colocar alrededor del material enterrado trozos de piedra caliza (carbonato de calcio) con propiedad neutralizante. Además se hace necesaria la protección

del metal con distintas cubiertas. Los *recubrimientos de cinc* (galvanizado) reducen notablemente la pérdida de peso y el picado de los aceros, pero éstos deben estar aislados del contacto con otros metales para prevenir su deterioro por corrosión galvánica. Se emplean también cubiertas de cemento y de caucho blando en reemplazo de las metálicas. Sin embargo el método común de prevenir la corrosión de componentes de acero en suelos agresivos es mediante revestimientos de compuestos bituminosos reforzados con tela o fibra de vidrio, con auxilio de la protección catódica.

## MÉTODOS ELECTRICOS DE CONTROL

Los métodos eléctricos de control de la corrosión son: protección catódica, protección anódica y aislación eléctrica.

### PROTECCION CATODICA

Ya se ha mencionado que, si la superficie de un metal se la coloca a un potencial suficientemente negativo aplicado desde una fuente externa se frena la corrosión. Esta es la base de la protección catódica para prevenir la corrosión de estructuras metálicas enterradas en suelos o sumergidas (navíos, tuberías, tanques, diques, bases de estructuras, pilotes, etc.).

El acero, cobre, plomo, bronce, están entre los metales que pueden protegerse con esta técnica. Para ello se le aplica

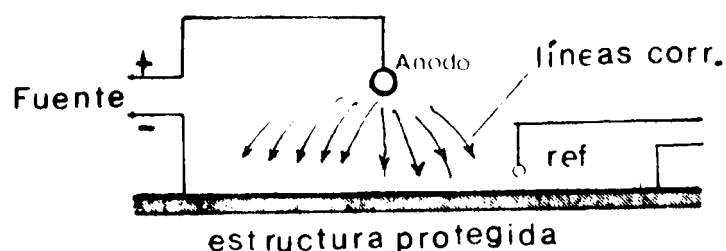


Figura 11.- Protección catódica por corriente impresa

al sistema una corriente continua externa, generalmente con un rectificador transformador de bajo voltaje. El terminal positivo está conectado a un ánodo auxiliar (*dispersor*) de grafito, chatarra, ferro-silicio, dióxido de rutenio o circonio, separa-

do de la estructura a ser protegida y el terminal negativo está soldado a la estructura misma (figura 11).

En la práctica la corriente requerida para proteger una estructura no revestida resulta demasiado grande para que el método sea económico. La estructura es, por lo tanto, generalmente revestida en la mayor parte posible. Así la protección catódica se emplea únicamente para hacer frente a imperfecciones de la protección debido a porosidad, rayaduras o ampollamiento de la cubierta.

Una estructura también puede protegerse con *ánodos de sacrificio*. En este caso el electrodo auxiliar es de un material más activo que el metal a ser protegido. El ánodo de sacrificio es el ánodo de una celda de corrosión, de tal manera que la corriente circula saliendo del ánodo de sacrificio y entrando en la pieza metálica protegida (figura 12).

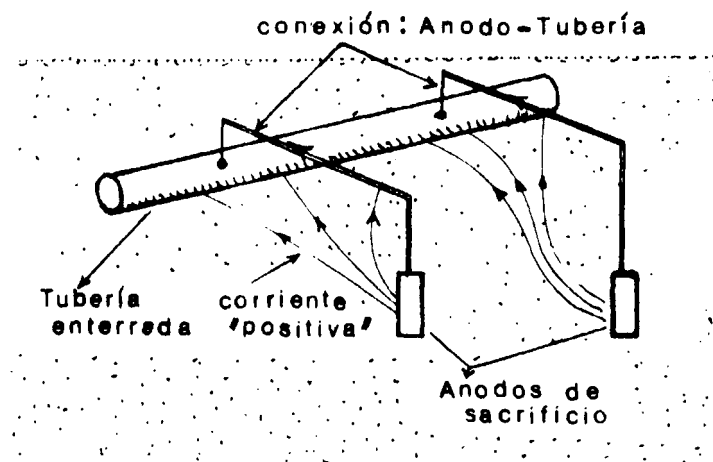


Figura 12.- Protección catódica por ánodos de sacrificio

El empleo de un ánodo de sacrificio (magnesio, aleaciones a base de magnesio, cinc y aleaciones de aluminio) provee la propia fuente de energía eléctrica en aquellos casos particulares donde no es factible la aplicación de una corriente externa. Obviamente la protección cesa normalmente cuando el ánodo de sacrificio se consume totalmente, se interrumpe anormalmente cuando hay defectos en las soldaduras de los contactos del ánodo de sacrificio o cuando se los recubre con pintura.

En estos tipos de protección y especialmente para la pro-

tección de cascos de navíos el problema de la *distribución de la corriente eléctrica* es de suma importancia. Su cálculo teórico resulta muchas veces complicado.

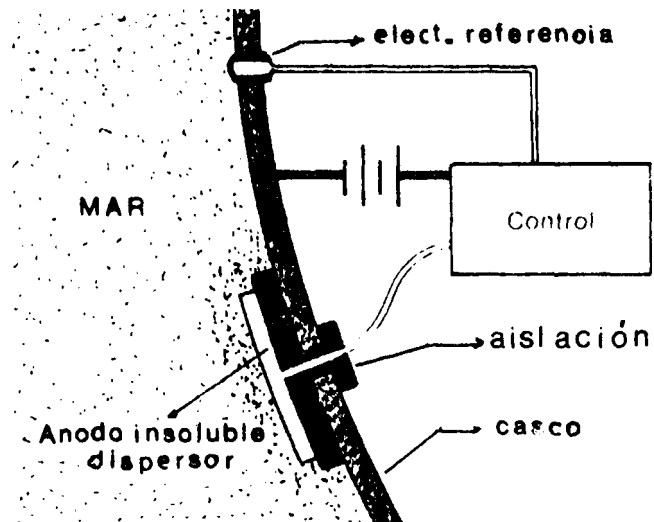


Figura 13.- Protección catódica del casco de un navío por corriente impresa

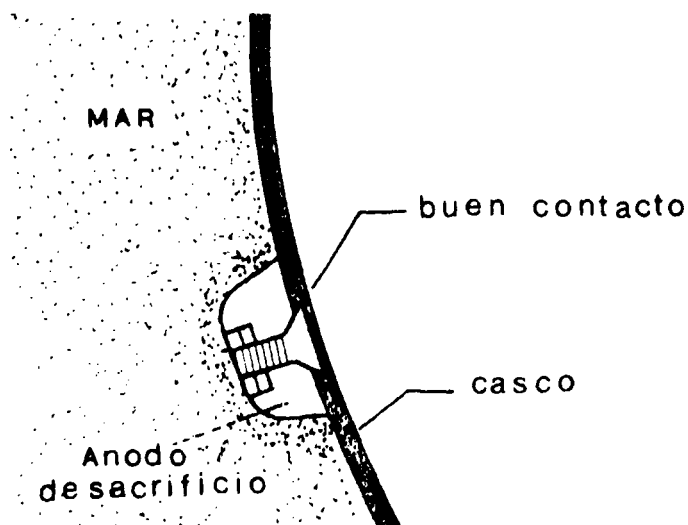


Figura 14.- Protección catódica del casco de un navío por ánodos galvánicos

En la práctica es usual distribuir tanto a los ánodos dispersores en el caso de protección por corriente impresa (figura 13), como los ánodos de sacrificio (figura 14) según criterios empíricos.

## PROTECCION ANODICA

La protección anódica se aplica a metales que bajo ciertas condiciones forman películas pasivantes que los protegen de la corrosión.

Algunos metales forman cubiertas protectoras por simple tratamiento con ácidos oxidantes o pueden tornarse pasivos por polarización anódica en ciertos medios electrolíticos (acero en ácido sulfúrico, nitrato de amonio).

Para la protección anódica se aplica una corriente continua externa en la dirección opuesta a aquella de la protección catódica (figura 15).

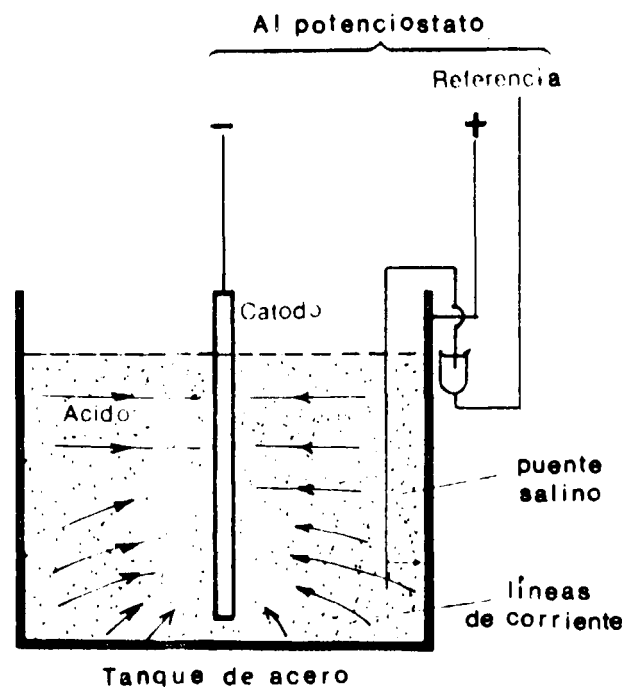


Figura 15.- Protección anódica de un tanque de acero

Cuando el potencial del ánodo se hace más positivo se produce la pasividad del metal. La densidad de corriente necesaria para lograr esa pasivación es en general alta, pero una vez establecida se la mantiene con una corriente mínima. Esta técnica permite proteger zonas inaccesibles (tuberías, válvulas, etc.). Una protección anódica mal aplicada puede llevar a la corrosión rápida de la estructura metálica.

## AISLACION ELECTRICA

El *aumento de la resistencia eléctrica de una celda de corrosión* en cualquier parte de su circuito reduce el flujo de corriente y, por lo tanto, la velocidad de la corrosión. Así por ejemplo, la resistividad eléctrica del agua desmineralizada es mayor que la de una solución salina y consecuentemente la velocidad de corrosión de un metal en la primera es menor que en la segunda.

Muchas veces la modificación en la disposición de una tubería evitando suelos de baja resistividad (corrosivos) reduce el riesgo de corrosión, pero cuando eso no es posible se emplean recubrimientos de mejor calidad insertando uniones aislantes entre las secciones de la tubería.

## REVESTIMIENTOS PROTECTORES

Los *revestimientos* usados para proteger un metal de la corrosión se agrupan en: *metálicos, inorgánicos y orgánicos*. Pueden proteger por aislación directa, por protección de sacrificio o por inhibición.

Los recubrimientos *impiden el contacto directo entre el medio y el metal*. La *eficacia de los recubrimientos aislantes* depende de su grado de homogeneidad y de ausencia de fallas (poros, rayaduras, ampollas, etc.). Entre estos materiales se incluyen esmaltes vítreos, lacas, pinturas sin inhibidor, plásticos y protectores temporarios. Entre los metálicos al níquel y cromo depositados sobre acero, que son más nobles que este último.

Los revestimientos *actúan como barrera* donde el revestimiento es continuo y donde ocurren discontinuidades proveen protección catódica lo mismo que los ánodos galvánicos en una estructura enterrada o inmersa. En este último caso el revestimiento es menos noble que el metal que se protege bajo las condiciones corrosivas que prevalecen en el sistema.

Los metales ferrosos pueden ser *protegidos sacrificialmente* por un revestimiento de cinc (galvanizado), cadmio o aluminio. Las aleaciones de aluminio-cinc confieren protección a otras de aluminio, mientras que las aleaciones de cobre son protegidas por el cinc.

Los recubrimientos sacrificiables deben ser lo suficientemente gruesos para durar la vida de servicio del componente, pues se corroen lentamente, consumiéndose en el transcurso de su acción protectora.

Los *recubrimientos inhibidores* incluyen a todos los esquemas de pintura, grasa o aceite que contenga en suspensión o disolución una sustancia con propiedades inhibidoras.

Actúan básicamente como barrera, pero dado que ningún revestimiento orgánico es totalmente impermeable a la humedad, también proveen como reserva un inhibidor de corrosión en la interfase metal/medio corrosivo.

Cualquier revestimiento protege sólo en la medida que posea adherencia. Esta es función de la limpieza y preparación de la superficie de la pieza antes del revestimiento.

A continuación se manejan algunos de los *métodos más importantes* para la aplicación de distintos tipos de revestimiento protector.

#### CUBIERTAS METÁLICAS

*Por pistola (volatilización)*. Esta técnica es muy usada para la aplicación de cinc, de aluminio y sus aleaciones sobre acero y aluminio. El metal en la forma de alambre o polvo se atomiza sobre la superficie.

*Enchapado*. Este procedimiento es aplicable principalmente a superficies planas. En este caso ambas caras de la pieza metálica, se cubren por láminas delgadas del material protector y sometida a laminación en caliente. El enchapado es usado a menudo para protección por ánodos de sacrificio o por cubiertas pasivas como el acero inoxidable.

*Inmersión en caliente*. El componente a cubrir, previa limpieza y tratamiento con fundentes, se sumerge en un baño del metal fundido (generalmente cinc, latones o aluminio), obteniéndose un revestimiento adherente y de regular espesor.

*Cementación*. La superficie externa de la pieza a ser protegida se convierte en una aleación de mayor resistencia a la corrosión por tratamiento térmico en contacto con polvo de cinc ("Sherardising"), polvo de aluminio ("Calorising") o compuestos gaseosos de cromo ("Chromising").

*Electrodeposición*. La mayoría de los metales y aleaciones pueden ser recubiertos por electrodeposiciones empleando distintos baños electrolíticos. La galvanotecnia es un método de protección elegido para cubiertas metálicas relativamente finas y de espesor controlado. Los metales de acabado superficial más comunes son el cromo, níquel, latones, cinc, estaño, plomo, cadmio, etc. El cromado además de proteger tiene también función decorativa. Los depósitos de cromo poseen una película pasiva de óxido con carácter catódico frente a las áreas no cubiertas por imperfecciones (ma-

cro poros, rayaduras, etc.). En estas últimas el metal subyacente es anódico pudiéndose, en consecuencia, originar picaduras. Por esta razón previo al cromado se electrodeposita níquel que protege al metal base en las posibles fallas. Se han desarrollado varias combinaciones de revestimientos de níquel/cromo de considerable protección contra la corrosión atmosférica.

#### REVESTIMIENTOS INORGANICOS

Todos los revestimientos inorgánicos son quebradizos y por lo tanto implican el riesgo de corrosión en sus grietas, defectos o zonas frágiles. Debido a la imposibilidad de evitar imperfecciones el empleo de protección catódica auxiliar impide la corrosión del metal cubierto en los defectos comunmente presentes.

*Esmaltes vítreos.* Los revestimientos de tipo vidrio obtenidos por fusión de fritas de variadas composiciones a base de sílico-boratos de metales alcalinos y alcalino-térreos sobre el componente a proteger origina vidriados resistentes a la atmósfera y a otros medios corrosivos. Dada la potencial fragilidad de estas cubiertas su empleo se limita a tanques de poca capacidad de uso doméstico (termotanques, sanitarios, utensilios de cocina, etc.).

*Cemento.* Son los revestimientos más baratos, con coeficientes de dilatación similares al acero, de fácil aplicación por centrifugado, salpicado o por simple espatulado. Se emplean tanto en la protección de tuberías de acero como también en cubiertas interiores de tanques de agua fría o caliente, de aceites y de combustibles.

#### REVESTIMIENTOS POR CONVERSION

Son los producidos por tratamiento químico de la superficie metálica con diferentes soluciones. Hay tres tipos principales de revestimientos por conversión.

*Fosfatizado.* Se aplica principalmente al acero, pero también al cinc y cadmio. El acero se trata con ácido ortofosfórico diluido en agua con incorporación de fosfatos de hierro, cinc y manganeso. Estos revestimiento sólo confieren protección limitada a la corrosión siendo su principal aplicación en tratamientos superficiales previo al recubrimiento por pinturas.

*Cromatizado.* Como el anterior se emplean preferencialmente sobre aluminio y sus aleaciones y en aleaciones de magnesio, cadmio y cinc. Ofrecen un alto grado de resistencia a la corrosión y son muy adecuados para asegurar una buena adherencia de recubrimientos orgánicos.



*Anodizado.* Es un proceso electrolítico donde el material a ser tratado es el ánodo de una celda electrolítica con soluciones apropiadas para producir películas de óxidos protectores sobre la superficie. Este proceso es aplicado a varios metales y aleaciones no ferrosas en especial al aluminio confiriendo buena resistencia a la corrosión y en tratamientos superficiales con fines decorativos.

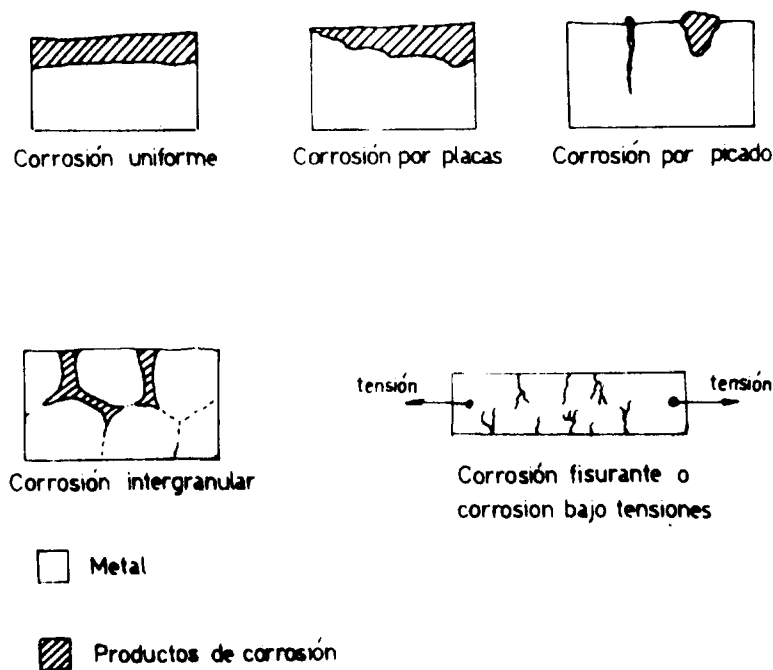
#### REVESTIMIENTOS ORGANICOS

Son los más importantes y se describen detalladamente más adelante, en los capítulos correspondientes.

## ATAQUE LOCALIZADO

En el capítulo anterior se describieron los mecanismos de corrosión y protección de metales; se verán ahora las diferentes formas bajo las cuales dicha corrosión se propaga. En la figura 16 se da un ejemplo de las diferentes formas en las que la corrosión puede presentarse, encontrándose que en general cuanto más localizada es la corrosión tanto mayores los daños que produce.

La forma de corrosión más benigna es la *corrosión uniforme*. Es la más benigna porque, sabiendo la velocidad de dicha corrosión, es posible calcular el adelgazamiento de pared del metal en función del tiempo. Esto permite prever la vida útil del componente y eventualmente sobredimensionarlo si esto fue-



*Figura 16.- Formas de corrosión*

se necesario. Cuando la corrosión tiende a localizarse, como se ve en la *corrosión por placas*, el cálculo de la vida útil resulta más difícil, pero aún es posible.

En los otros casos de corrosión descritos en la figura 16 ya no se encuentra relación entre la magnitud de la corro-

sión total y el daño provocado. En la *corrosión por picado*, también conocida como "pitting", el ataque se localiza en un punto de la superficie metálica, y puede propagarse profundamente dentro del metal. Aquí una corrosión total muy pequeña puede causar la perforación de una pared metálica con los consiguientes trastornos, tales como pérdidas de líquidos o gases, falta de estanqueidad en componentes críticos, etc. Esto puede ocasionar serios accidentes si los fluidos liberados son peligrosos, o puede dejar fuera de servicio circuitos críticos cuando se presenta, por ejemplo, en circuitos hidráulicos, o contaminar seriamente el agua de las calderas cuando aparece en tubos de condensadores de vapor.

Otra forma de corrosión localizada es la *corrosión intergranular*. En este caso, una corrosión total muy pequeña produce la disgregación del metal en pequeños fragmentos, perdiéndose totalmente la resistencia mecánica del metal.

Finalmente se tiene otra forma de corrosión que se presenta en forma de fisuras que se propagan rápidamente dentro del metal. Esta se conoce como *corrosión bajo tensión* y va acompañada por una corrosión total del metal muy pequeña, casi despreciable. Sin embargo es altamente nociva porque produce la fisuración del metal con las consecuencias imaginables.

Se verán a continuación cada una de estas formas de corrosión por separado, para analizar las causas de su aparición, así como las posibles formas de evitarlas.

## CORROSION POR PICADO

Tal como se viera en el capítulo anterior, muchos metales resisten a la corrosión del medio ambiente debido a la presencia de una capa fina de óxido que cubre al metal y lo aísla del medio. Por esta causa metales que reaccionan muy fácilmente con la atmósfera y que desde un punto de vista termodinámico son poco estables, son utilizados muy extensamente en la práctica. Tal es el caso del aluminio, que reacciona con el agua o el aire con gran desprendimiento de energía. Sin embargo, al reaccionar con el agua o el aire forma una capa de óxido de aluminio o alúmina, muy delgada y de alta resistencia mecánica. Esta película, que es invisible a simple vista, aísla al metal del medio ambiente y detiene la corrosión. Otros metales que son resistentes a la corrosión por formación de películas protectoras son el titanio, el cromo, el circonio, el tantalio y otros, así como aleaciones de gran importancia tecnológica, tales como los aceros inoxidable.

El uso de estos metales cubiertos con películas protectoras está muy extendido en la práctica, debido a su muy alta resistencia a la corrosión y a su costo moderado. Sin embargo, suelen encontrarse problemas cuando estos metales son usados en algunos medios corrosivos. En presencia de iones agresivos, la película pasivante se rompe en algunos puntos. En dichos puntos la corrosión se vuelve muy grande y tenemos el fenómeno de picado. Como la película protectora es muy resistente, la velocidad de corrosión es muy baja. De este modo una chapa de acero inoxidable, si tiene, por ejemplo, un milímetro de espesor, puede usarse en la atmósfera durante varios cientos de años con corrosión total muy pequeña. Pero si hay iones agresivos se inicia el picado y el acero inoxidable puede perforarse en el término de unas pocas horas. El problema tendría sólo interés académico si los iones agresivos fuesen poco comunes. Lamentablemente uno de los iones más agresivos, desde el punto de vista del picado es el *ion cloruro*. Tal como el lector sabe, este ion, que forma el cloruro de

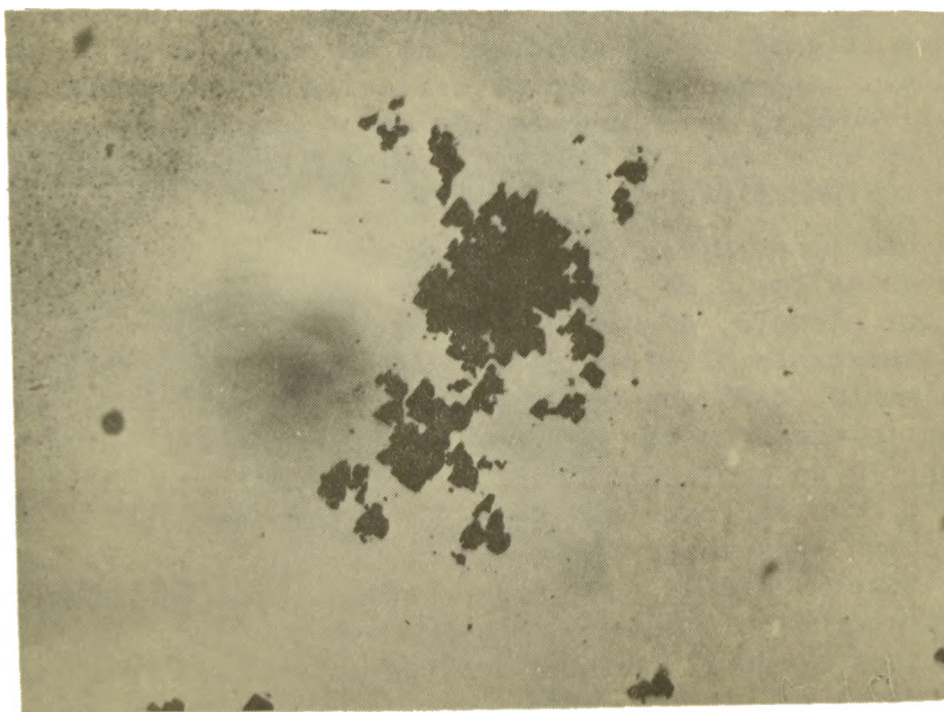


Figura 17.- Picado de aluminio en agua de mar, visto con aumento de 200X

sodio o sal común, se encuentra muy extendido en la naturaleza, siendo el agua de mar una solución rica en dicha sal. Se encuentra también en otros medios, tales como la sangre, por lo que este tipo de corrosión se presenta también en implantes quirúrgicos, utilizados en el cuerpo humano. Se encuentra además como contaminante

en la mayoría de las sustancias de uso común. Esto hace que el proceso de picado no sea un problema raro, sino que se encuentre con mucha frecuencia en la práctica.

La figura 17 muestra como se ve el picado del aluminio en agua de mar, cuando se lo observa con un microscopio. El ataque se limita a unos pocos puntos, en tanto que el resto del metal continúa pasivo.

Además de los cloruros, también pueden causar picado los *ioduros, bromuros, sulfatos, nitratos*, etc. Sin embargo, su presencia en el medio ambiente es poco frecuente. Interesan principalmente en la industria química donde el manipuleo de dichas sustancias es frecuente.

Veamos ahora *cómo se inicia el picado*. La película pasivante, debido a su pequeño espesor, sufre permanentemente rupturas. Normalmente, el metal expuesto en las zonas donde la película se rompe, se repasa rápidamente. En presencia de los iones agresivos, en cambio, la zona vecina a la falla del óxido muestra importantes cambios de composición. Al reaccionar los iones metálicos con el agua (figura 18) se produce una solución ácida en contacto con el metal. Esta solución ácida dificulta la formación de la película pasivante y la falla en el óxido no puede sellarse espontáneamente. De este modo, en aquellas zonas donde el óxido ha fallado, la corrosión se propaga rápidamente.

Dado que la acidificación localizada es la causa del picado, una forma de evitarlo es *dificultar tal acidificación*. Esto puede hacerse, por ejemplo, *alcalinizando el medio*. Otra forma de lograrlo es agregando al medio sales tales como silicatos, boratos, etc. Finalmente, dado que el picado es un fenómeno electroquímico, también se lo puede evitar *bajando el potencial del metal*, mediante una especie de protección catódica. En este caso no es necesario llegar a la zona de inmunidad total, tal como se hace en protección catódica común. Basta con llevar al metal a un potencial en el cual la película pasivante es estable. Es así que los ánodos de cinc pueden proteger al aluminio contra el picado en agua de mar. Del mismo modo, el acero al carbono protege catódicamente al acero inoxidable contra el picado en agua de mar.

La *acidificación localizada* se alcanza más fácilmente dentro de rendijas o fisuras que en una superficie lisa. Esto se debe a que, al ser difícil renovar el líquido corrosivo en dichas rendijas, se llega a grados de acidificación muy grandes. Esta es una variación del proceso de picado, y se conoce como corrosión en rendijas o hendiduras ("crevice corrosion"). En agua de mar, uno de los materiales que más sufre esta forma de ataque es el acero inoxidable. La figura 19 muestra un tornillo y arandelas de acero inoxidable del tipo AISI 304, que formaban parte de una estructura de este metal que fue expuesta durante seis meses a la acción del agua de mar.

Figura 18.- Reacciones químicas dentro de las picaduras en los metales

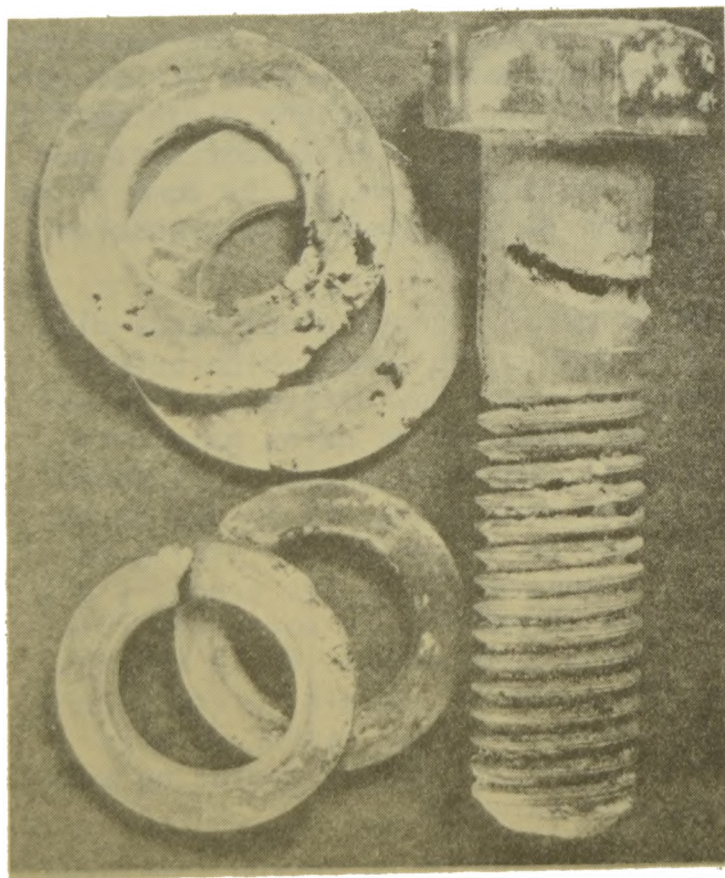
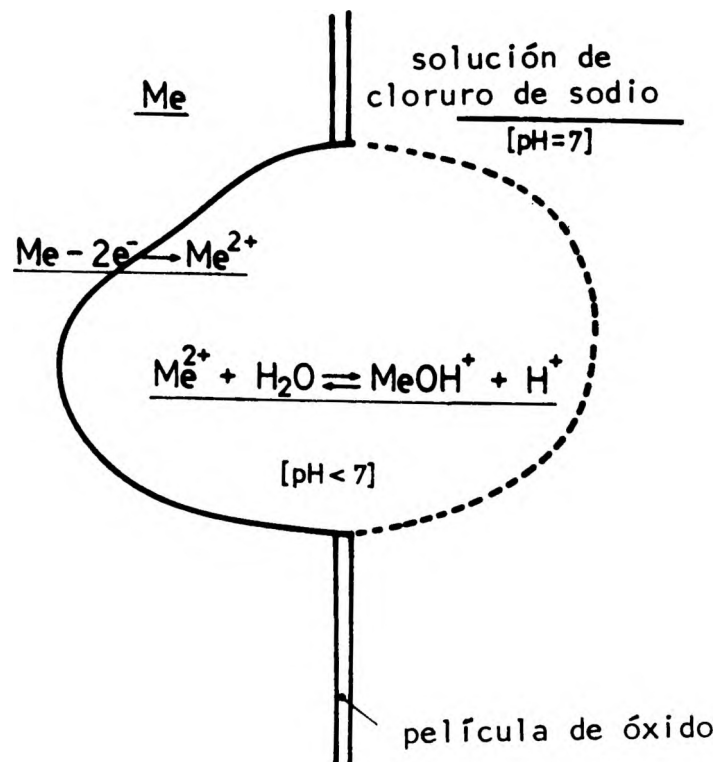


Figura 19.- Corrosión por rendijas de acero inoxidable expuesto al agua de mar, luego de 6 meses de exposición

Al desmontar dicha estructura, se encontró que en las rendijas se había producido un ataque muy intenso.

Las rendijas pueden ser resultado del diseño de la estructura metálica o pueden aparecer durante el uso de la misma. Por ejemplo, las incrustaciones biológicas, tan frecuentes en agua de mar, producen rendijas debajo de las cuales se localiza la corrosión. Se conocen así casos de fallas de tubos de condensadores provocadas por incrustaciones biológicas. Si un mejillón se fija en un tubo de condensador, debajo de dicho mejillón se presenta una zona de pobre renovación de líquido, donde en poco tiempo se produce la perforación del tubo del condensador.

### CORROSION INTERGRANULAR

Si se analizan los metales a nivel atómico, se observa que los mismos presentan un apilamiento compacto de átomos, todos ellos ordenados en estructuras cristalinas simples. Si una pieza metálica tiene, en toda su extensión, los átomos ordenados en una misma dirección, se dice que es un monocristal. Este ordenamiento en una sola dirección se presenta, por ejemplo, en cada grano cúbico de la sal común. Sin embargo, debido a las técnicas de producción de los metales, ningún metal o aleación de uso común se presenta como un monocristal. Si se mira una pieza metálica al microscopio, se observará que la misma está compuesta por un conglomerado de granos, desorientados entre sí. Es como si se tomara una gran cantidad de granos de sal común y se prensaran para formar un bloque sólido.

Los límites de grano, en el metal, tienen propiedades diferentes al resto del grano. Por ejemplo, la composición química de la zona del límite de grano suele ser muy diferente a la del resto del grano. Esto lleva a la formación de pares galvánicos, y si en dichos pares galvánicos el límite de grano es el ánodo, tendremos un caso de corrosión muy localizada. Es lo que se conoce como *corrosión intergranular*. La corrosión del límite de grano llevará eventualmente a la separación de los granos y a la disgregación del metal. La figura 20 muestra la corrosión intergranular de aluminio en agua a alta temperatura. En la muestra de la izquierda la corrosión intergranular revela la estructura de granos del metal. A la derecha se observan restos de otra muestra. En este último caso la corrosión intergranular ha avanzado tanto que llegó a "desgranar" al metal.

Existen en la práctica muchos casos de corrosión intergranular. Una forma muy importante es la conocida como sensibilización de los aceros inoxidable. Esta se produce luego de soldar



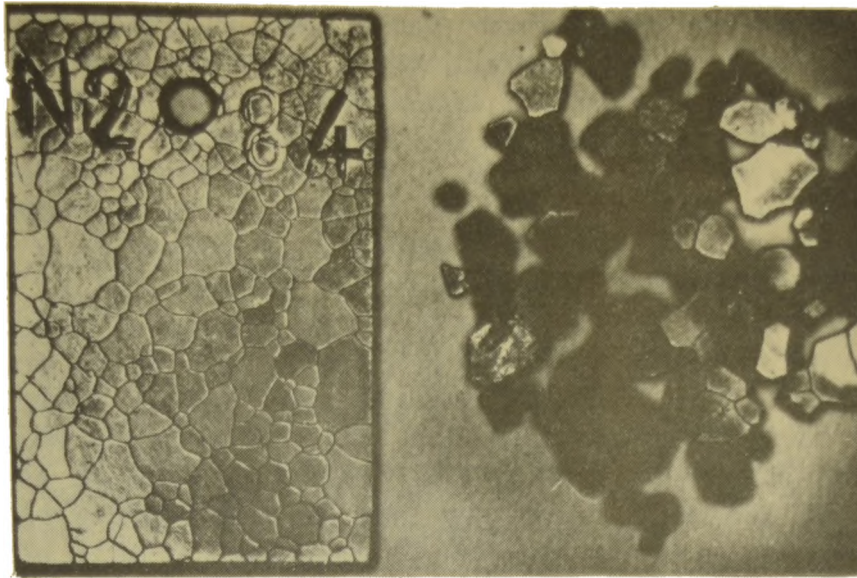


Figura 20.- Ejemplo de corrosión intergranular, Aluminio de alta pureza, corroído en agua a 200°C, en autoclave

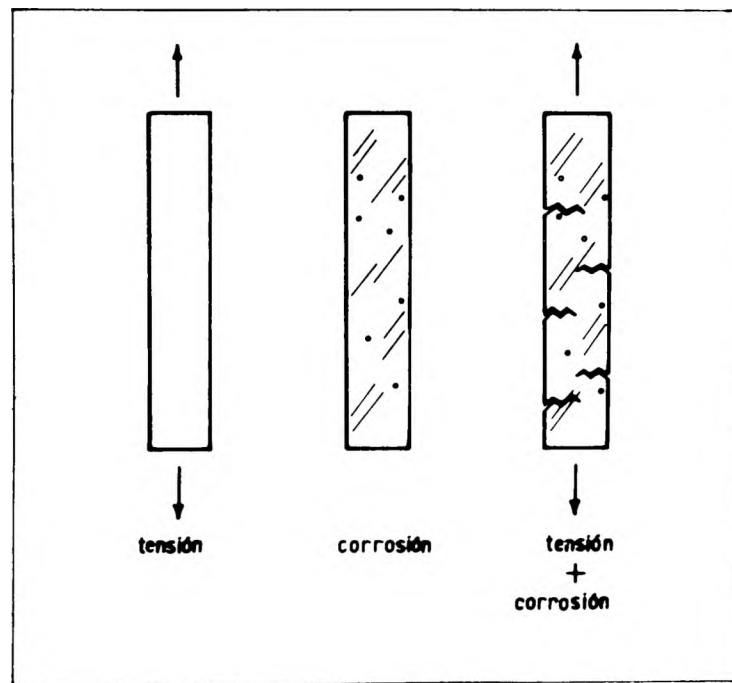


Figura 21.- Corrosión bajo tensión



una chapa de acero inoxidable. A pocos milímetros del cordón de la soldadura y a ambos lados del mismo, es donde el acero inoxidable se sensibiliza. Corresponde a la zona donde el material se ha calentado a unos 800°C. Los aceros inoxidables comunes contienen una pequeña cantidad de carbono. La misma es del orden de 0,08 por ciento. La resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables se debe a que contienen más de 12 por ciento de cromo. Si tuvieran menos cromo, no serían resistentes a la corrosión y se corroerían a la misma velocidad que un acero al carbono. Al calentar un acero inoxidable común a una temperatura de alrededor de 800°C, se forma un carburo de cromo, que contiene del orden de 94 por ciento en peso de cromo. O sea que una pequeña cantidad de carbono es suficiente para secuestrar una cantidad importante de cromo. El carburo precipita en los límites de grano. Como resultado de esto, junto a los límites de grano se forma una capa de metal pobre en cromo, que no es resistente a la corrosión. Si exponemos a este acero inoxidable a la acción de un medio corrosivo, se produce una severa corrosión intergranular.

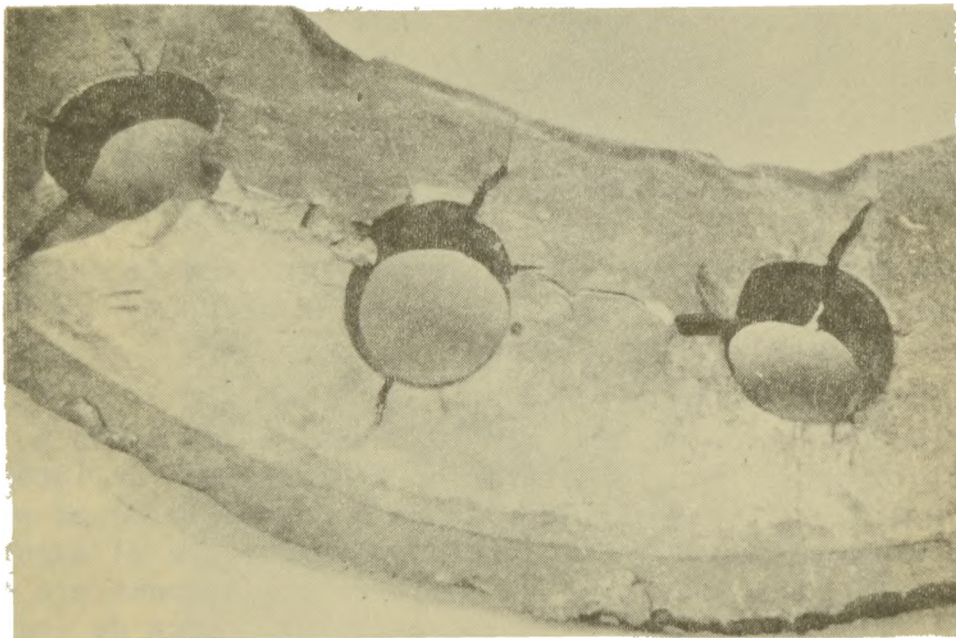
La *sensibilización de los aceros inoxidables* se puede evitar utilizando aceros inoxidables estabilizados. Estos aceros contienen aleantes, tales como el titanio, que forman carburos muy estables e impiden que el carbono se combine con el cromo. Otra forma de evitar este problema es utilizando aceros inoxidables de muy bajo contenido de carbono. Comercialmente se los consigue con aproximadamente 0,01 por ciento de carbono y aún menos. Con contenidos de carbono tan bajos se ha observado que no se presenta la sensibilización durante la soldadura.

## CORROSION BAJO TENSION

Normalmente se seleccionan los metales de tal modo que la acción corrosiva del medio ambiente sobre ellos sea moderada. Al mismo tiempo estos metales están sometidos a tensiones mecánicas cuyo signo y magnitud suelen variar con el tiempo. Mediante una adecuada selección de materiales y un diseño conveniente es posible conseguir que dichas acciones no tengan efectos nocivos en la vida útil del material. Sin embargo, se ha comprobado que en condiciones especiales, un metal sometido simultáneamente a la acción de tensiones mecánicas y a una acción corrosiva puede presentar el fenómeno llamado *corrosión bajo tensión*. En este caso (figura 21) aparecen en el metal fisuras que se propagan hacia su interior. La velocidad de propagación de tales fisuras puede variar entre unos pocos milímetros por año hasta varios milímetros por hora. Es muy importante destacar la simultaneidad de la acción corrosiva y de la acción mecánica. Las fisuras se propagan solamente cuando ambos factores actúan simultáneamente. Si una vez iniciada

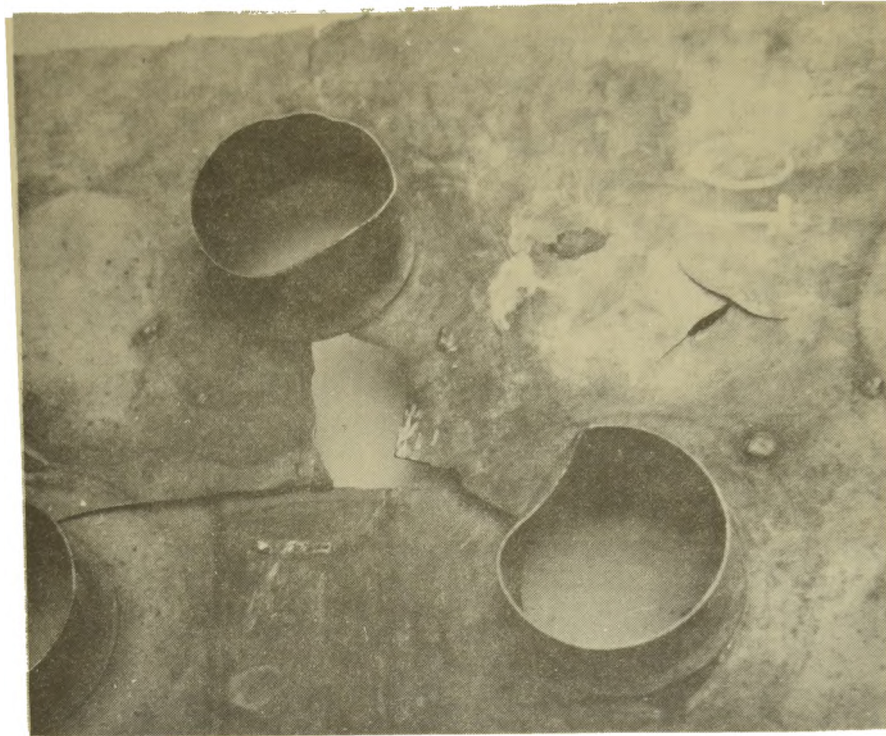
la fisuración se eliminan las tensiones mecánicas, las fisuras se detienen, pese a que el medio corrosivo sigue actuando. Del mismo modo si, iniciadas las fisuras, se mantienen las tensiones mecánicas pero se elimina el medio corrosivo, las fisuras también se detienen.

Esta forma de corrosión ha estado ligada permanentemente a todo avance tecnológico y su complejidad es tal que aún no se cuenta con métodos infalibles para predecir nuevos casos de corrosión bajo tensión. Para ilustrar lo anterior se hará una breve reseña histórica del problema. El primer ejemplo que se encuentra en la literatura sobre esta forma de corrosión es la que afecta a los aceros de bajo carbono en presencia de álcalis. El problema aparece con el uso de calderas de vapor y los primeros



*Figura 22.- Ejemplo de corrosión bajo tensión o "fragilidad cáustica", en calderas a vapor*

casos de fallas debidas a este fenómeno no están bien documentados. Al comienzo las rupturas y explosiones se atribuían a fallas del material o a defectos de diseño. Entre 1865 y 1870 se registraron solamente en Inglaterra 288 casos de explosiones de calderas. Fallas similares ocurrían en la misma época en otros países industrialmente avanzados. Muchas de estas fallas son atribuibles ahora a corrosión bajo tensión. La figura 22 muestra un fragmento de una caldera a vapor que sufrió este tipo de corrosión. Estudios cuidadosos mostraron que las fallas estaban relacionadas con una elevada alcalinización del agua de las calderas. Mediante un cuidadoso control del pH de dicha agua es posible ahora evitar este tipo de problema.



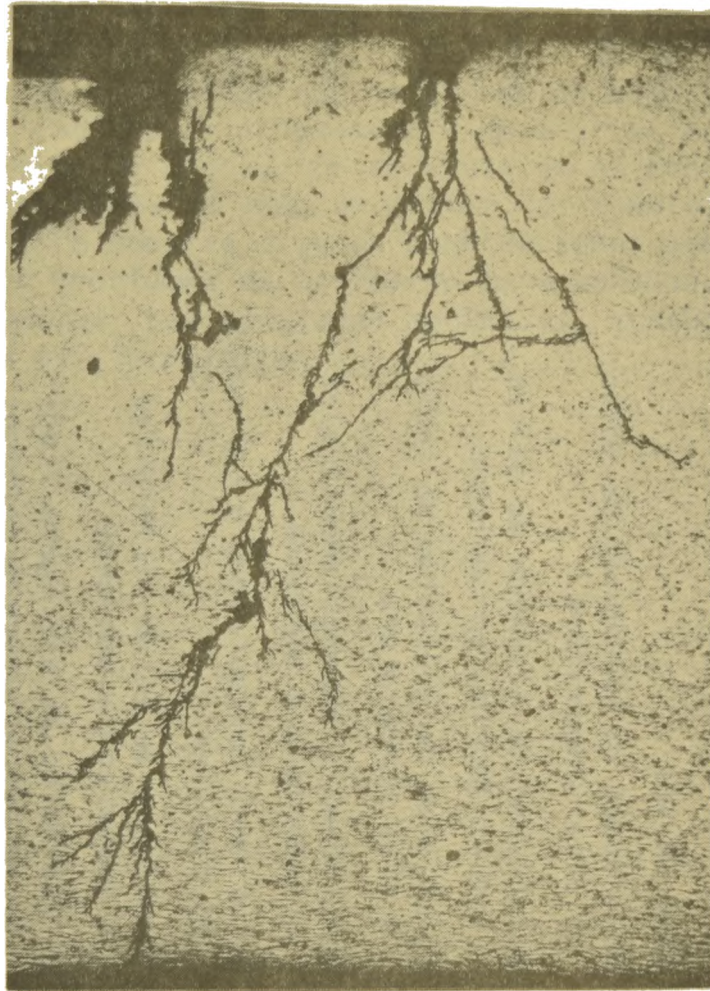
*Figura 23.- Ejemplo de corrosión bajo tensión en aceros inoxidable. Platos de columna de destilación corroídos*

Otro tipo de corrosión bajo tensión que era frecuente a fines del siglo pasado era la fisuración de cartuchos de latón. Durante la Guerra de los Boers se planteó la urgencia de un estudio del problema. Estudios cuidadosos mostraron que el agente corrosivo que producía este tipo de falla en los latones era el amoníaco. El mismo se originaba en los establos, cerca de los cuales se ubicaban los depósitos de municiones. El amoníaco contenido en la atmósfera, acompañado por una humedad elevada y por un clima cálido, llevaba a la aparición de esta forma de corrosión. Este tipo de fallas se pudo controlar reduciendo el tenor de las tensiones mecánicas, ya que no había forma fácil de actuar sobre el medio corrosivo, como se había hecho en el caso de las calderas. Las tensiones mecánicas de los cartuchos provienen del estampado en frío del latón durante la fabricación de dichos cartuchos. Este procedimiento deja en el metal tensiones mecánicas muy elevadas. Mediante un recocido del metal es posible eliminar la mayor parte de estas tensiones, desapareciendo así uno de los dos factores indispensables para esta forma de corrosión.

En 1937 se registraron las primeras fallas de corrosión bajo tensión de los aceros inoxidable, al comenzar el uso industrial de estas aleaciones. La figura 23 muestra el plato de una columna de destilación que ha sufrido corrosión bajo tensión.



Obsérvese que el metal se ha roto con apariencia frágil, pero si se ensaya mecánicamente este material se verá que sigue siendo dúctil. Es típico del proceso de corrosión bajo tensión la apariencia de ruptura frágil en materiales dúctiles. Esto se debe a que la fisura se propaga profundamente en el metal, sin que se produzca una deformación plástica importante. Esto se ve en la figura 24 donde aparecen, vistas bajo un microscopio, fisuras de



*Figura 24.- Vista microscópica (50X)  
de la corrosión bajo tensión en ace-  
ros inoxidable*

corrosión bajo tensión en acero inoxidable. Las fisuras en el acero inoxidable son en general transgranulares y el agente corrosivo más frecuente es el ión cloruro a alta temperatura.

En los últimos años se han descrito muchos otros casos de corrosión bajo tensión, encontrándose en general que es difícil predecir las condiciones en las que este tipo de falla puede aparecer. La dificultad de prever nuevos casos de corrosión ba-

## ALGUNOS CASOS TÍPICOS DE CORROSIÓN BAJO TENSION

Aleación	Medio Corrosivo	Tipo de fisura
Al-4 % Cu	Agua de mar	Intergranular
Al-Mg-Zn	Agua de mar	Intergranular
Aceros de bajo carbono	Soluciones de hidróxido de sodio a alta temperatura	Intergranular
Aceros de bajo carbono	Soluciones de nitratos de calcio, sodio o amonio, en caliente	Intergranular
Aleaciones de níquel	Soluciones de hidróxido de sodio a alta temperatura	Variable
Latones tipo 70 % Cu-30 % Zn	Soluciones y vapores amoniacales a temperatura ambiente	Intergranular
Aceros inoxidables austeníticos	Soluciones concentradas y calientes de cloruros	Transgranular
Aceros inoxidables austeníticos	Soluciones de ácido clorhídrico a temperatura ambiente	Transgranular
Aleaciones de titanio	En tetróxido de nitrógeno líquido; en tetracloruro de carbono; en metanol; o en ácido clorhídrico concentrado	Variable
Aleaciones de circonio	En soluciones de cloruro de sodio con oxidantes a temperatura ambiente	Variable

jo tensión la ilustran los problemas surgidos durante el Proyecto Espacial Apolo. En una fase muy avanzada de este proyecto se encontró que las aleaciones de titanio se corroían bajo tensión en presencia de tetróxido de nitrógeno ( $N_2O_4$ ). Este compuesto había sido usado previamente sin dificultades. Sin embargo, al purificar el tetróxido de nitrógeno, imprevistamente se eliminó un producto que actuaba como inhibidor de la corrosión bajo tensión. La identificación de este inhibidor permitió solucionar el problema.

En general se observa que la corrosión bajo tensión sólo aparece para cada metal en presencia de ciertos agentes corrosivos. Como medida de precaución se trata de seleccionar adecuadamente los materiales de modo de evitar las combinaciones nocivas. La tabla adjunta muestra algunas combinaciones que deben evitarse, para eliminar problemas de corrosión bajo tensión. Otra medida posible es excluir las tensiones mecánicas, cuando la naturaleza del problema así lo permite.



## ALEACIONES RESISTENTES A LA CORROSION

Al hablar de un metal o aleación resistente a la corrosión se piensa de inmediato en los metales nobles: platino, rodio, oro, plata, etc. o en los metales muy resistentes, como el tantalio, pero su elevado precio los hace inaccesibles en la mayoría de las aplicaciones prácticas. Así surge la necesidad de buscar otros metales o *aleaciones resistentes* en cierto grado a la corrosión.

Al dejar de lado los metales nobles se descubre que el término *resistencia a la corrosión* es demasiado vago para ser útil. No existen las aleaciones resistentes a la corrosión. Sólo existen aleaciones resistentes a ciertas formas de corrosión. Para ilustrar esto mencionaremos el caso de las aleaciones hierro-cromo-níquel. De esta familia de aleaciones, las que han encontrado un uso más amplio son los *aceros inoxidable austeníticos* con aproximadamente 18 por ciento de cromo y 8 por ciento de níquel. La amplitud de sus aplicaciones proviene de sus propiedades mecánicas, su resistencia a la oxidación en aire a temperaturas de hasta 800°C y su excelente resistencia a la corrosión en medios acuosos levemente oxidantes. Sin embargo, cuando existe el riesgo de corrosión bajo tensiones se descubre que dicha elección no ha sido muy feliz pues esta aleación es la que menor resistencia ofrece a este tipo de fenómeno, dentro de los aceros inoxidable austeníticos.

Otro ejemplo interesante es el de las aleaciones de aluminio. A temperatura ambiente la corrosión del aluminio es acelerada si está aleado con metales tales como el cobre, níquel, hierro, platino, etc. Se observa también que cuanto más puro es el aluminio tanto más resistente es a la corrosión electroquímica a la temperatura ambiente. Sin embargo, cuando se utiliza aluminio en agua pura a 200°C se observa que el comportamiento del metal es totalmente opuesto al anterior. En dichas condiciones, el aleado de los metales arriba mencionados reduce la velocidad de corrosión del aluminio. En agua a alta temperatura, cuanto más puro es el aluminio tanto más pronto se corroe.

Los ejemplos mencionados muestran que al mejorar la resistencia a la corrosión de una aleación en un cierto medio puede ocurrir que se la empeore en otro. Por esto, al hablar de *aleaciones resistentes a la corrosión*, debe tenerse presente el tipo de corrosión y el medio al que se refiere.



## MÉTODOS DE BÚSQUEDA DE ALEACIONES RESISTENTES

La experiencia muestra que la obtención de aleaciones resistentes a la corrosión se ha logrado hasta ahora por los siguientes tres métodos: por accidente, por tanteo y por consideraciones teóricas.

Se considerará cada caso en particular.

*Por accidente.* Por supuesto este método no se puede tomar muy en serio pero hay que reconocer que el número de hallazgos de índole técnica y científica debidos a accidentes es muy grande y bien conocido. Se puede mencionar el caso del acero inoxidable. El estudio de las aleaciones de hierro-cromo y hierro-cromo-níquel data de principios de este siglo; sin embargo, la aplicación práctica de aceros inoxidables en cuchillería se debe a H. Bearley (1913, Sheffield, Inglaterra). Este observó que probetas de hierro con un 14 por ciento de cromo, que habían sido descartadas en una serie de ensayos, conservaban su brillo tras una larga exposición a la intemperie. Bearley encontró una aplicación práctica a partir de una observación accidental que de otro modo pudo haber pasado desapercibida.

*Por tanteo.* El uso de este método en la búsqueda de aleaciones resistentes es bastante frecuente y la experiencia muestra que si bien en algunos casos es el único camino posible, en la mayoría de ellos los resultados obtenidos no compensan el esfuerzo realizado. Un ejemplo de este método es la búsqueda de aleaciones aplicables en reactores nucleares de potencia. Dichas aleaciones deben ser resistentes a la corrosión en agua a alta temperatura. Para este uso se requieren aleaciones de baja sección de captura de neutrones, por lo que esto restringe el número de metales utilizables. De ellos se seleccionaron solamente dos: el circonio y el aluminio.

Como ninguno de estos metales poseía una aceptable resistencia a la corrosión en agua a alta temperatura, se inició una búsqueda sistemática de aleaciones resistentes. Para ello se prepararon aleaciones binarias de circonio y de aluminio con distintos contenidos de casi todos los elementos de la tabla periódica y se ensayó la resistencia a la corrosión de todas ellas. De esta manera y luego de gran número de ensayos (pues el efecto de cada aleante debe ser ensayado a varias concentraciones y en combinación con otros elementos), se llegó finalmente a los Zircaloy (Zr-1,5 % Sn) y a la aleación de aluminio X-8001 (Al-1 % Ni-0,6 % Fe).

*Por consideraciones teóricas.* El desarrollo de aleaciones resistentes a partir de consideraciones teóricas es el método más adecuado. Para aplicarlo hay que conocer el mecanismo del proceso corrosivo que se quiere evitar. Esta condición no es fácil de cum-

plir, por lo que este método ha alcanzado aplicación apreciable a partir de algunos campos de la corrosión metálica. En la oxidación a alta temperatura, por ejemplo, el amplio conocimiento de los mecanismos de oxidación ha permitido diseñar numerosas aleaciones resistentes a esta forma de corrosión. En cambio, en los casos de corrosión electroquímica lo conocido en la actualidad es demasiado pobre aún, por lo que las aleaciones resistentes a este tipo de corrosión han progresado en forma muy desigual.

## RESISTENCIA A LA CORROSION DE LOS ACEROS INOXIDABLES Y ALEACIONES DE ALUMINIO EN ATMOSFERAS MARINAS

### ACEROS INOXIDABLES

En el ensayo de estas aleaciones en atmósferas marinas son importantes las variables tales como distancia al océano, dirección de vientos, frecuencia de lluvias, etc. Contenidos en cromo por encima de 18 por ciento tienen en general poco efecto sobre la corrosión localizada en atmósfera marina. La presencia de níquel aumenta en algo la resistencia, en tanto que la presencia de un 3 por ciento de molibdeno tiene un efecto notable. Paneles de acero inoxidable tipo 316 mostraron una apariencia excelente luego de una exposición de 11 años a una atmósfera marina. El acero tipo 304, en cambio, luego de igual período de exposición mostró manchas y puntos de óxido en su superficie.

Los aceros inoxidables tipo 304 y 430 fueron ensayados para diferentes aplicaciones a bordo, tales como piletas, mesadas, etc. Estos equipos son limpiados con detergentes y abrasivos suaves y en tales condiciones el acero inoxidable da resultados satisfactorios prefiriéndose el uso del tipo 304 por requerir menor mantenimiento.

De las muchas aplicaciones de aceros inoxidables ensayados en agua de mar, solamente unas pocas han sido satisfactorias. Ellas están relacionadas generalmente con dos circunstancias:

- a) Accidental o intencionalmente el acero inoxidable se encuentra protegido catódicamente.
- b) El acero inoxidable está expuesto al agua de mar que ha estado en movimiento continuo, con un flujo no inferior a 1,8 metros/segundo.

Las incrustaciones marinas, que se adhieren a cualquier superficie, producen rendijas dentro de las cuales se inicia el ataque localizado. Velocidades del agua de mar superiores a 1,8 metros/segundo impiden la fijación de incrustaciones. Se ha observado un excelente comportamiento en rotores y carcasas de bombas centrífugas.

gas contruidos con aceros inoxidables.

La protección catódica de los aceros inoxidables puede lograrse mediante corriente impresa o utilizando ánodos de cinc, de aluminio o de acero de bajo carbono.

Los aceros inoxidables de la serie 400 no deben ser utilizados nunca en agua de mar por presentar un ataque serio y rápido. Con estos aceros no se puede aplicar la protección catódica, debido a que se fragilizan por el hidrógeno desprendido en el cátodo.

No es aconsejable el uso de los aceros inoxidables tipo 316, 316L, 304 y 304L en los condensadores por los que circula agua de mar o en presencia de aguas contaminadas de puerto, debido a la susceptibilidad a la corrosión en rendijas y al picado.

#### ALEACIONES DE ALUMINIO;

Las ventajas del uso de aleaciones de aluminio en la construcción de buques residen en su menor densidad, lo que da lugar a una mejor estabilidad de la nave y ahorro en el consumo de combustible, la resistencia a la corrosión en agua de mar de sus aleaciones y su relativamente bajo precio.

El comportamiento a la corrosión generalizada de las aleaciones de aluminio es superior al de los aceros al carbono. Esto es debido a la formación de un óxido de aluminio que está siempre presente en la superficie del metal. Esta película protectora posee la ventaja adicional de ser una buena base para el pintado. En caso de que la pintura se dañe, la corrosión no se propaga debajo de la misma, en el área adyacente.

La buena resistencia a la corrosión de estas aleaciones varía con la composición, siendo algunas de ellas totalmente inadecuadas en medios marinos. Por ejemplo, las aleaciones de aluminio-cobre endurecibles por precipitación, con apreciables contenidos de cobre (2-6 por ciento), no deben utilizarse en atmósferas marinas.

Las consideraciones más importantes a tener en cuenta en el uso de las aleaciones de aluminio en las construcciones navales son las siguientes:

- a) *La correcta elección de la aleación.* Existen notables diferencias en la resistencia a la corrosión entre las distintas aleaciones de aluminio utilizadas con fines estructurales.
- b) *Compatibilidad con otros metales.* Las aleaciones de aluminio son muy susceptibles a la corrosión por pares galvánicos producidos por depósitos o contacto con otros metales más nobles, especialmente con cobre, níquel o hie-

rro o sus aleaciones. Se deben utilizar materiales aislantes en las juntas con este tipo de metales. El mercurio y sus compuestos aceleran notablemente la corrosión del aluminio.

- c) *Manipuleo*. Las aleaciones de aluminio no son mecánicamente tan resistentes como los aceros y requieren un manipuleo más cuidadoso.
- d) *Tratamiento térmico*. El tratamiento térmico y/o la condición metalúrgica de la aleación es muy importante; puede ser necesario el tratamiento térmico de la aleación para desarrollar la máxima resistencia a la corrosión.
- e) *Codificación*. Debido a que todas las aleaciones de aluminio son muy similares en apariencia, es esencial una adecuada codificación de las mismas para evitar confusiones en los astilleros.



# CORROSION MICROBIOLOGICA

## CONTAMINACION DE COMBUSTIBLES PARA TURBINA

### ANTECEDENTES

El problema de la *contaminación microbiológica* de combustible de aviones comenzó a manifestarse en la década del 50 en la Aviación Militar y en la del 60 en la comercial, como consecuencia del uso de kerosene para turbinas en reemplazo de la nafta usada para motores a pistón. El nuevo combustible empleado por los aviones dio lugar al desarrollo de diversas especies microbianas, en cuyo lodo biológico se determinó la presencia de levaduras, hongos y bacterias.

La contaminación siempre está presente pero sólo se observan problemas cuando se dan las *condiciones favorables para el crecimiento de los microorganismos*. El nuevo combustible resultó ser un adecuado alimento de ciertas especies, en especial del hongo filamentoso *Cladosporium resinae*, denominado comúnmente "el hongo del kerosene".

Una complicación accesoria se debió a que contemporáneamente las alas comenzaron a utilizarse como depósitos de combustible, los que se designaron "tanques integrales". Se observó que el desarrollo microbiano traía aparejada la corrosión de las aleaciones de aluminio con las que estaban construidos estos tanques.

Habiéndose determinado que los microorganismos no crecen en el combustible en ausencia de agua libre, se pudieron implementar medidas para el control del problema, tales como frecuentes drenajes de los depósitos, modificaciones de diseño que impidieran el estancamiento del agua de condensación, empleo de filtros separadores de agua, etc.

Si bien estas medidas reducen a un mínimo los riesgos de desarrollo microbiano el problema no está resuelto y se manifiesta cuando se descuida la vigilancia o se resta importancia a las operaciones de mantenimiento.

Fue necesario bastante tiempo antes de poder concluir que el problema de la contaminación es imposible de evitar en las actuales condiciones de operación, referentes al transporte, depósito y almacenamiento de kerosene del tipo del JP1 empleado como combustible.

También se ha observado proliferación microbiana en el sistema de combustible de buques, sobre todo en aquellos en los que se utiliza agua de mar como balasto o para desplazamiento. Uno de los principales problemas al respecto está asociado al desarrollo de bacterias marinas anaeróbicas, que ocurre en el agua de mar en el fondo de los tanques bajo el combustible, ocasionando el bloqueo de filtros y corrosión de su estructura.

#### FALLAS EN SERVICIO

Entre los problemas causados por la *proliferación microbiana*, caben destacar la obturación de los filtros de turbinas de aviones y buques, el mal funcionamiento de las bombas impulsoras y de los instrumentos medidores del nivel de combustible, la corrosión de las aleaciones de aluminio que forman la estructura de las alas de aviones o de acero de los tanques de buques, el deterioro de los recubrimientos interiores de los tanques y la pérdida de calidad del combustible.

Respecto al problema de corrosión de tanques integrales de aviones su gravedad reside en que se trata de un ataque muy localizado en la zona donde se adhieren las colonias y que penetra formando fisuras que pueden dar lugar a su perforación o propagarse ocasionando roturas del tipo de las encontradas en casos de fatiga de aleaciones.

El deterioro del recubrimiento de los tanques deja expuesta la aleación al ataque microbiano localizado.

El mal funcionamiento de los medidores de combustible de tipo capacitivo está vinculado más a la presencia de agua que a la de microorganismos y por ello se lo observa simultáneamente con la proliferación, que también requiere del agua para ocurrir.

En el caso de tanques de combustible de buques, las bacterias sulfato-reductoras, además de provocar el desarrollo de un lodo biológico que causa bloqueo de filtros de turbinas en las unidades que utilizan el combustible (buque, aviones), reducen los sulfatos del agua de mar a sulfuros. Estos sulfuros son sustancias ácidas, que pueden disolverse en el combustible acidificándolo, con lo que causan corrosión en los respectivos circuitos de alimentación (tanques desplazables y no desplazables por agua de mar, tanques de servicio, tanques integrales de aviones, cañerías, etc.). El lodo acumulado actúa como fuente de contaminación de combustible limpio durante los reabastecimientos e interfiere en el tratamiento del agua con biocidas. Por ello es imprescindible eliminarlo, lo que evita además su propagación al resto del circuito de combustible.

## CARACTERISTICAS

En el caso de aviones, la temperatura desciende durante el vuelo, por lo que el agua presente tiende a separarse, sedimentando en el fondo de los tanques. Al volver a tierra la temperatura comienza a aumentar favoreciendo la germinación de las esporas, que ocurre al cabo de algunos días de estancamiento. El crecimiento continúa, si las condiciones climáticas son favorables, pudiéndose encontrar en poco tiempo, importantes desarrollos de una flora compuesta principalmente por hongos y bacterias.

El principal constituyente del material biológico encontrado en depósitos de tierra y en tanques integrales de aviones es un hongo denominado *Cladosporium resinae*.

Sus esporas miden aproximadamente 2 x 3 micrones y pueden sobrevivir por largos períodos prácticamente en cualquier medio. Se encuentran en el suelo, son transportados por el viento y tienen ocasión de ingresar a los depósitos de tierra a través de los venteos. Por su tamaño muy pequeño no son retenidas por los filtros a través de los que se abastecen de kerosene los aviones. El empleo de filtros capaces de retenerlas haría muy lenta la carga. La presencia de esporas, sin embargo, no representaría ningún problema si se pudiera asegurar la ausencia de agua, disuelta o no, en contacto con el combustible.

La textura de ese lodo biológico, que se localiza en la interfase combustible-agua para disponer de los nutrientes orgánicos e inorgánicos presentes en cada una, es distinta según que predominen unos u otras.

El lodo formado por *Cladosporium resinae* es consistente, compacto, adherente y de coloración gris, marrón o negra, mientras que un lodo bacteriano está constituido por el agregado de finas partículas que por agitación se dispersan. Ambos tipos de microorganismos dan lugar a coloraciones o sedimentos que se observan principalmente en la fase acuosa.

El grado de contaminación del combustible o del agua en contacto con él se mide por la cantidad de partículas capaces de crecer (número de esporas y bacterias por centímetro cúbico de combustible o de agua respectivamente).

El grado de proliferación es una medida del número de colonias que se desarrollaron en un dado depósito y que pueden aportar nuevas partículas capaces de reproducirse. La proliferación conduce, por lo tanto, a un aumento de la contaminación. Debido a la gran abundancia relativa de *Cladosporium resinae* en lodos biológicos de depósitos de combustible para aviones el grado de contaminación por este hongo da la medida del grado de proliferación del depósito.



## FACTORES

Para un combustible con un cierto grado de contaminación los factores que determinan la proliferación microbiana son:

- a) El *agua*, sin la cual no se produce la germinación de las esporas de hongos para formar colonias y llegar a desarrollar grandes matas, ni pueden crecer y multiplicarse las bacterias.
- b) Los *minerales*, que al concentrarse en el agua son utilizados como nutrientes.
- c) La *temperatura* a la que se mantiene el kerosene en presencia de agua, que cuando es del orden de los 0°C inhibe la proliferación por bastante tiempo y cuando se mantiene alrededor de los 20°C favorece la aparición de colonias en la interfase combustible-agua, al cabo de varios días. Si la temperatura del tanque se estabiliza próxima a los 30°C se puede hallar en pocos días una proliferación muy abundante que se extiende a toda la interfase del depósito.
- d) El *tiempo de contacto* entre el kerosene y el agua, que determina el grado de desarrollo y reproducción microbianos que pueden alcanzarse, ya que con tiempos prolongados de estancamiento se da la posibilidad de fructificación de todas las partículas presentes, aun de las que pueden requerir un cierto período para adaptarse a ese medio.

Un mayor o menor grado de contaminación hace que los factores enunciados sean más o menos importantes. Pero en última instancia, *el único factor realmente crítico es el agua.*

## EL AGUA EN DEPOSITOS TERRESTRES, EN TANQUES INTEGRALES DE AVIONES Y EN BUQUES

Es económicamente impracticable disponer de combustible libre de agua. Su presencia en él es fácilmente explicable por ser esencial en el procesamiento del petróleo y lavado del producto final. Se la emplea a veces para desplazarlo y hasta se usa agua de mar, con este fin, en ciertos buques. También puede ingresar como lluvia a través de los venteos de depósitos de tierra y de barcos.

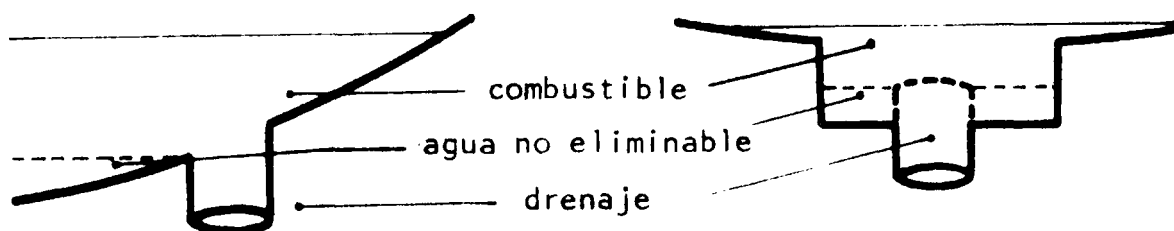
El agua que proviene de la humedad ambiente puede considerarse aceptable en un tanque limpio y adecuadamente recubierto por pintura. El drenado periódico asegura que las esporas de hongos que queden en el combustible se mantengan como tales, sin germinar.

El agua sucia, por el contrario, contiene sales o residuos

ácidos (orgánicos o inorgánicos), mercaptanos y agentes tensoactivos como impurezas comunes, constituyendo la más importante fuente de complicación, ya que cada una de estas sustancias empeora el problema. Los agentes tensoactivos dificultan la separación del agua incorporada al kerosene y estabilizan la suciedad en el mismo.

Las sales disueltas actúan como sustancias nutritivas para los microorganismos, la suciedad se incluye entre las matas de colonias de hongos manteniéndose en el interior del tanque a pesar de los drenajes de agua, los mercaptanos atacan los recubrimientos dejando expuesta la aleación, etc. Por ello, en este caso es crítico hacer más frecuentes los drenajes.

Un abundante crecimiento de microorganismos, especialmente hongos, puede causar el bloqueo de las bocas de drenaje, impidiendo su diaria eliminación. Fallas de diseño, por las que los drenajes no estén situados en los puntos más bajos de los depósitos o cañerías pueden enmascarar su presencia, de modo que la ausencia de agua eliminable no significaría estar a salvo del problema en estos casos. En tales condiciones, aun el agua de condensación libre de contaminantes, aporta su cuota de peligrosidad porque el estancamiento provee el tiempo necesario para que las esporas se desarrollen.



*Figura 25.- Drenajes inapropiados*

Durante los drenajes de los tanques integrales de aviones se debe abrir lentamente la válvula para evitar el vórtice que puede provocar la salida de combustible aunque no se haya eliminado completamente el agua subyacente.

En el caso de los tanques desplazados por agua de mar se debe encontrar otra forma de combatir la proliferación ya que es imposible eliminar el agua. El tener que descartar combustibles acidificados por la actividad bacteriana, realizar tareas de limpieza y decontaminación de depósitos y cañerías por lodo biológico, ocasiona grandes pérdidas de dinero y tiempo que deben evi-

tarse a través de adecuadas medidas de control

#### SITUACION ACTUAL

En la bibliografía se citan numerosos enfoques destinados a controlar el problema de la proliferación microbiana en depósitos de combustibles.

a) Se ensayaron 17 técnicas de esterilización del combustible, ya sea eliminando las esporas o inhibiendo su capacidad de proliferar. Las técnicas que se utilizaron se basan en la aplicación de métodos físicos o mecánicos para separar las esporas, cuyas dimensiones son de unos  $2 \times 3 \mu$  (ultrafiltración, ultracentrifugación, etc.) o para esterilizarlas (aplicación de radiofrecuencia, radiación gamma, calor, etc.). Aunque efectivas, su aplicación a los grandes volúmenes de combustible involucrados resulta imposible en la actualidad por razones de costo u operatividad.

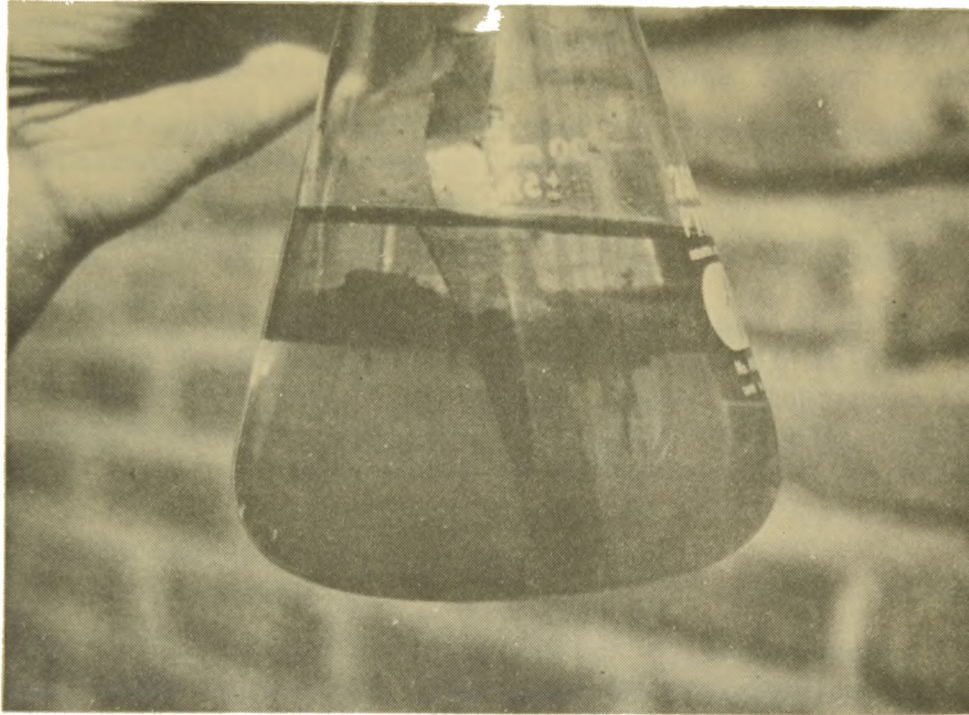
b) También se han ensayado métodos químicos, basados en la adición al combustible de biocidas solubles en agua; los tóxicos habitualmente usados como pesticidas son bien resistentes por el hongo *Cladosporium resinae*, por lo que debió ensayarse un sinnúmero de sustancias no convencionales. En algunos casos se combinaron con agentes mutagénicos que, al promover la continua mutación, impedían el desarrollo de cepas estables, resistentes al biocida.

De las numerosas sustancias probadas sólo dos se aceptan y se utilizan actualmente en aviación, tanto civil como militar; por un lado el éter monometílico del etilenglicol (EGME), empleado comúnmente como anticongelante y biocida y por otro una mezcla de organoborinanos.

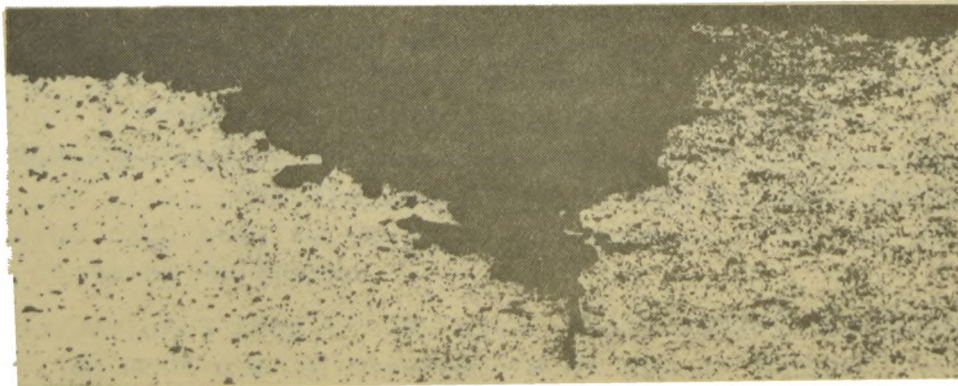
Se tiende generalmente a restringir el empleo de estos aditivos al mínimo imprescindible, ya que pueden ocasionar riesgos de magnitud comparable a los que se trata de evitar:

- el EGME actúa estimulante de la proliferación microbiana cuando su concentración cae por debajo del rango de efectividad (500 a 1500 ppm en el combustible) y es fácil que esto ocurra si no se controla su concentración en la fase acuosa, debido a que es eliminado durante los drenajes de agua;

- Los organoborinanos pueden deteriorar los álabes de turbina si se emplea el combustible adicionado con 270 ppm del biocida, que es la concentración especificada para esterilización; se lo puede consumir en las turbinas sólo si su concentración se disminuye a 135 ppm al



*Figura 26.- Probeta de aluminio en contacto con colonias fúngicas desarrolladas en la interfase combustible para aviones/agua*



*Figura 27.- Corte de aleación de aluminio sometida a corrosión microbiológica*

cabo de un máximo de 72 horas de tratamiento del tanque.

c) Se intentó evitar la proliferación microbiana mediante la eliminación de las fracciones de hidrocarburos de combustible utilizable por los microorganismos. Dado que *Cadosporium resiniae* es capaz de metabolizar alcanos de longitud de cadena comprendida entre C8 y C18, esta alternativa es de limitada aplicación pues se trata de un corte que aporta gran potencia al combustible.

d) La deshidratación es una de las más viables técnicas de control, ya que inhibe la reproducción de bacterias presentes en el combustible seco aun durante cortos períodos, pero las esporas de hongos tienen una larga supervivencia en estas condiciones.

Actualmente se realizan estudios sobre distintos tipos de biocidas adicionales al agua de mar en tanques desplazables, que sean rápidamente degradables cuando se arrojan al mar disueltos en el agua utilizada para desplazar el combustible. Se buscan especialmente sustancias fotodegradables de corta vida.

## CONTROL

Dado que la presencia de agua resulta esencial para que haya proliferación, es a través de su *drenaje* que se puede asegurar el control del problema.

El análisis biológico del agua eliminada permite diagnosticar el grado de riesgo de contaminación tanto de un depósito de tierra como de un tanque integral o de cualquier otro sistema en que se produzca interfase combustible-agua. Se los considera *contaminados* cuando han contenido abundante crecimiento fácilmente detectable a simple vista. La tarea de descontaminación implica no sólo la limpieza mecánica para desprender y eliminar el material biológico adherido, sino también la esterilización de paredes y fondo, mediante solución al 70 por ciento de alcohol etílico en agua, que deberá dejarse actuar entre 15 minutos y 2 horas.

### *Depósitos de tierra*

La *limpieza de estos depósitos* es el primer paso para controlar la contaminación microbiana del combustible.

Se logra manteniendo en buen estado los filtros a través de los que ingresa y haciendo drenajes diarios de agua hasta eliminación de combustible, con lo que se arrastran al exterior las partículas capaces de proliferar, que se acumulan en la interfase con el agua. Cuanto más límpida está el agua recogida menor es el grado

de contaminación del depósito porque su análisis arroja un menor recuento microbiano.

Como los microorganismos pueden ingresar por los venteos, un tanque limpio *que no se drene* durante un período apreciable (una semana o más), eliminaría agua muy sucia pues habrá ocurrido proliferación microbiana.

En verano este control debe ser más cuidadoso. El riesgo mayor aparece en regiones húmedas y cálidas.

Cuando el agua drenada indica por su aspecto la presencia de abundante crecimiento microbiano, es importante tomar las medidas necesarias para evitar la contaminación de los tanques de aviones o buques. Ello se logra aumentando la frecuencia de los drenajes del depósito y asegurando el buen estado de los filtros a la salida del combustible. Conviene además intercalar un filtro fino hacia la abastecedora y cargarla a la menor velocidad posible.

### *Abastecedoras*

Los vehículos que abastecen a los aviones deben a su vez mantenerse limpios y con los filtros en buenas condiciones. A la salida de sus mangueras se encuentran filtros de agua y los filtros más finos que debe atravesar el kerosene hasta su ingreso al avión, aunque no lo suficiente como para retener partículas tan pequeñas como son las bacterias y las esporas de los hongos.

Todas ellas ingresan al avión con el combustible por este único camino, durante el reabastecimiento.

### *Tanques integrales de aviones*

Respecto del mantenimiento de estos tanques, es importante hacer una diferencia fundamental entre los aviones que cumplen servicios regulares en empresas comerciales y los que prestan servicio en bases militares.

Los aviones comerciales están prácticamente en constante operación, de modo que no hay ocasión de que el combustible pase por períodos prolongados de contacto con agua, que posibiliten la proliferación. Sus tanques se drenan después de cada descenso y de los reabastecimientos, con la consiguiente eliminación de bacterias, esporas de hongos y sustancias nutrientes. Es mayor el tiempo de vuelo, a muy bajas temperaturas, que el de estadía en tierra a temperatura ambiente, por lo que rara vez el combustible que almacenan alcanza condiciones de riesgo.

Los aviones militares, en cambio deben pasar prolongados pe-

ríodos en tierra, lo que significa mayores temperaturas promedio dentro de los tanques. Si los drenajes de agua se hacen diariamente se logra eliminar nutrientes y contaminantes, pero como el drenaje rara vez puede ser completo, debido a la presencia de irregularidades en el fondo y a que las bocas de drenaje no siempre están en el punto más bajo, se dan las condiciones de contacto prolongado que favorecen el desarrollo de colonias microbianas.

En estos casos los drenajes deben ser diarios y las inspecciones hacerse por tiempo calendario, nunca por horas de vuelo.

Si existen dudas respecto de la calidad del combustible en algún reabastecimiento, conviene que su ingreso al avión se haga a través de un filtro adicional, separador de agua. Estos filtros se llevan a bordo y en caso de necesidad se intercalan entre la abastecedora y la toma del tanque.

Filtros similares aunque más grandes operan permanente y satisfactoriamente en depósitos de tierra y abastecedoras de algunos aeropuertos.

Los microorganismos son los contaminantes más fácilmente detectables. La presencia de materia retenida en un filtro de turbina debe ser considerada indicio de proliferación microbiana en el respectivo tanque. A efectos de verificar su naturaleza, basta con tomar una pequeña porción y guardarla en un frasco limpio y seco al que se agregará combustible y agua, extraídos del tanque correspondiente a la toma de la turbina afectada. El material biológico se ubicará en su mayor parte en la interfase. En otro frasco se coloca igual cantidad de kerosene y agua, de la misma procedencia que las utilizadas anteriormente y ambos se tapan, identifican y guardan a temperatura entre 20° y 30°C. Si la muestra recogida era de origen biológico, al cabo de una semana se notará un crecimiento apreciable del sólido acumulado en la interfase del primer frasco. La diferencia de aspecto del material contenido en el primero se deberá al crecimiento del residuo ensayado. Si la contaminación fuera muy importante se observará, además, en el segundo frasco, un leve desarrollo de colonias en la interfase.

Las inspecciones se hacen generalmente en forma visual, a través de las tapas de inspección.

Es conveniente complementarlas con la observación del aspecto del agua y combustible extraídos en los drenajes. Si bien las matas de hongos se adhieren a la estructura en los lugares donde se forman y no salen al drenar, el aspecto sucio, coloreado o con residuos es indicio de proliferación y sugiere la necesidad de inspección, aunque no se haya cumplido el plazo fijado para su realización.

Si se verificara crecimiento microbiano se impone su inmediata eliminación y si es muy importante, la decontaminación del tanque afectado, siguiendo las normas prescriptas al efecto y reparando el recubrimiento protector si fuera necesario.

Una dificultad que resta eficiencia al difícil trabajo de mantenimiento de los tanques integrales es la estructura del fondo que, por su complejidad, deja muchos sitios de donde es imposible eliminar el agua utilizando los drenajes. En tal sentido cabe destacar el sistema introducido en los tanques de los C-5. Cada uno de estos tanques está equipado con tomas de combustible distribuidas como dedos en los puntos más bajos, a través de los cuales, mediante un desvío de las tomas, se aspira el agua que es enviada a las turbinas y se quema junto al kerosene.

El método más efectivo para combatir la proliferación microbiana es la *adición de algún biocida*. A fin de evitar su consumo en las turbinas y dado que sólo hay riesgos de desarrollo microbiano cuando hay agua presente, el biocida debe tener un elevado coeficiente de partición a favor de la fase acuosa, es decir debe disolverse preferentemente en el agua y ser prácticamente insoluble en el combustible. Dos biocidas son aceptados al presente por las especificaciones militares y la aviación comercial. Ellos son el éter monometílico del etilenglicol y otro que es una mezcla de organoborinanos. Ambos se agregan al combustible en el momento de su ingreso al avión, en concentraciones que aseguren su efectiva acción antimicrobiana al concentrarse en los pequeños volúmenes de agua que pueden separarse en el fondo del tanque.

El control de la concentración de biocidas en la fase acuosa en equilibrio con el combustible es muy complicado en condiciones de servicio. Además, cuando la concentración del éter metílico del etilenglicol es menor que la necesaria para evitar la proliferación microbiana, puede estimular su desarrollo. Por ello es más aconsejable el que contiene organoborinanos, pues no presenta ese efecto indeseable. Las concentraciones habituales en que se emplea son de 135 a 270 ppm de biocida en el combustible, dependiendo del grado de infección alcanzado.

El uso más recomendable es el tratamiento de "shock", consistente en su introducción en el tanque del avión fuera de servicio a una concentración de 270 ppm en el combustible y luego de 24 horas de acción se agrega igual volumen de combustible para reducirla a 135 ppm. Recién entonces se pueden volver a poner en marcha las turbinas, a las que no debe llegar el combustible con una concentración mayor que 135 ppm en el biocida, para evitar la corrosión que puede ocasionar en los respectivos álabes.

Dicho tratamiento debe aplicarse sólo cuando hay evidencias de proliferación y no conviene que se repita por horas de vuelo u otra forma de periodicidad.



### *Tanques desplazados por agua de mar*

En presencia de los grandes volúmenes de agua contenidos en estos tanques el único procedimiento de aplicación práctica logrado es la adición de biocida hidrosoluble a la fase acuosa. Es generalmente imposible que los biocidas solubles en combustibles puedan alcanzar concentraciones suficientes en la fase acuosa, salvo cuando están en contacto con pequeños volúmenes de agua.

El método empleado para el control de bacterias sulfato-reductoras en tanques navales desplazados por agua de mar consiste en la adición de cromato de sodio hasta alcanzar una concentración de 0,10 a 0,15 por ciento en el agua. Dicho tratamiento se aplica en combinación con el análisis semanal del agua de estos tanques, en el que la presencia de las mencionadas bacterias indica la necesidad de nuevo agregado de tóxico. Debe aplicarse en los tanques limpios, ya que el cromato reacciona con sulfuros presentes en el lodo microbiano originando sustancias solubles en el combustible, que lo acidifican. Además, esta reacción consume cromato por lo que su eficiencia disminuye. Esta sustancia tiene además acción anticorrosiva sobre las paredes y fondo del tanque pero su gran inconveniente radica en su toxicidad para la vida marina cuando el agua tratada vuelve al mar durante el reabastecimiento de combustible.

Es imprescindible contar con tomas de agua del fondo de estos tanques, que permitan realizar un control semanal del nivel de proliferación alcanzado y con personal que pueda realizar a bordo esta determinación.

En caso de verificarse elevada proliferación se debe descartar el combustible, si se acidificó a niveles fuera de especificación y realizar limpieza que elimine el lodo biológico formado. Es conveniente realizar un tratamiento de "shock" con biocida a base de organoborinanos en el circuito de combustible libre de agua de mar. Al volver a cargar los desplazables se deberá agregar cromato de sodio al agua, en la concentración antes indicada para evitar la reinfección.

### CONCLUSIONES

El mejor resultado para combatir este problema podría lograrse si se aunara el esfuerzo del proveedor del combustible, de los fabricantes de buques y aviones y de quienes tienen a su cargo el mantenimiento de los depósitos terrestres y de los tanques. Todos ellos deben conocer los factores que influyen y en que medida pueden ayudar a minimizar sus consecuencias.

*El proveedor del combustible contribuirá a este objetivo entre-*

gándolo límpido y con un contenido en agua menor que 30 ppm, hasta descargarlo en los depósitos terrestres. Deberá realizar un adecuado mantenimiento de estos depósitos y de las abastecedoras.

El fabricante de buques y aviones, proveyéndolos con tanques que sean completa y fácilmente drenables, construidos y recubiertos con materiales resistentes a contaminantes microbianos, que indefectiblemente se presentan alguna vez.

Los responsables del mantenimiento de los depósitos terrestres y de los tanques integrales y no desplazados por agua de mar, drenándolos completa y frecuentemente, sobre todo en épocas y regiones cálidas.

En el caso de los buques, se debería mantener un adecuado control de la proliferación de bacterias sulfato-reductoras en el agua de mar de los tanques desplazables e implementar su tratamiento con biocidas cuando el resultado indique desarrollo microbiano.

#### CORROSION MICROBIOLOGICA DE TANQUES INTEGRALES DE AVIONES

Entre los problemas que causa en servicio la proliferación microbiana se citó la corrosión por picado de las aleaciones de aluminio que conforman los tanques integrales de aviones, la corrosión de tanques desplazados por agua de mar y la del resto del circuito por la acción del combustible acidificado por la actividad microbiana.

La importancia de los inconvenientes que se producen determinó que se buscara la solución al problema de corrosión a través de medidas tendientes a controlar la proliferación microbiana, con lo que simultáneamente se evita la aparición de los restantes problemas.

El estudio realizado sobre las aleaciones estructurales de aluminio que se emplean en la construcción de tanques integrales de aviones permitió verificar que todas ellas, al igual que el aluminio puro, son susceptibles de sufrir este tipo de corrosión.

En la literatura internacional sobre el tema se proponen distintas hipótesis para explicar el rol de los microorganismos en la corrosión de aleaciones y metales.

Los mecanismos a través de los cuales actuarían son: la producción metabólica de sustancias agresivas, principalmente ácidos orgánicos de cadena corta producidos por la biodegradación de hidrocarburos; la formación de celdas de aireación diferencial, originadas en la acción simbiótica de hongos aeróbicos y bacterias anaeróbicas; la despolarización de la reacción de reducción de hidrógeno como resultado de actividad hidrogenásica; la provisión de sistemas redox capaces de acelerar las reacciones anódicas o catódicas según la posibilidad de producir enzimas oxidasa o hidrogenasa;

y la *eliminación selectiva de átomos* de la aleación por actividad enzimática extracelular.

Mediante la aplicación de técnicas electroquímicas a la aleación 2024 T 351 se determinó que los metabolitos de un cultivo mixto obtenido de depósitos terrestres son los causantes de la disminución del potencial de picado de la aleación, debido a la proliferación microbiana. Este resultado proveyó los datos experimentales que apoyaron el primero de los mecanismos antes enunciados.

Posteriormente, empleando cultivos puros, se estableció que el hongo *Cladosporium resinae* y la bacteria aeróbica *Pseudomonas aeruginosa* son los que producen las sustancias capaces de promover el picado de la misma aleación. Se encontró además que las sustancias producidas también actúan sobre la reacción catódica, incrementando las corrientes de reducción de oxígeno.

Dichos resultados también se observaron en el caso del aluminio puro. Se determinó que los ácidos orgánicos producidos por acción metabólica de los hidrocarburos del combustible de aviación no afectan la tendencia al picado del aluminio y sus aleaciones. En cambio, el ácido dodecanoico, único ácido graso producido por dicho hongo, modifica los potenciales de picado en una magnitud similar a la encontrada con agua drenada de aviones con tanques contaminados y en cultivos puros del hongo y la bacteria antes mencionados.

La morfología del ataque encontrado depende del nivel de proliferación alcanzado, habiéndose determinado que cuando el desarrollo fúngico es escaso sólo produce corrosión generalizada. En cambio, por encima de cierto nivel de proliferación, la única forma de corrosión posible es el picado. En este caso, las corrientes de reducción catódica son varios órdenes de magnitud mayores que las medidas en ausencia de metabolitos de los microorganismos, lo cual conduce a elevadas velocidades de corrosión. Al limitarse la disolución del aluminio o aleaciones a pequeñas áreas pero con una alta velocidad de corrosión, se explica la rápida penetración del ataque, que puede llegar a la perforación del fondo del tanque. Este tipo de corrosión no depende de la acidez alcanzada por la fase acuosa en contacto con el combustible, dentro del rango estudiado que va desde pH 4 a 8,5.

Por consiguiente, es el anión del ácido dodecanoico el responsable del tipo de corrosión por picado que se produce cuando ocurre proliferación.

Debido a la capacidad de inhibir el desarrollo bacteriano que caracteriza a esta sustancia, es posible explicar que el hongo *Cladosporium resinae* sea el microorganismo que alcanza el mayor desarrollo y siempre esté presente cuando ocurre proliferación microbiana.

La posibilidad de la bacteria *Pseudomonas aeruginosa* de produ-

cir tal sustancia, inferida en base a su influencia en el descenso del potencial de picado de estas aleaciones, explicaría su presencia en algunos depósitos con alta proliferación fúngica. Sin embargo, su efecto es muy inferior al que produce el hongo, lo que estaría asociado a su menor posibilidad de producir ácido dodecanoico a partir de hidrocarburos y de sobrevivir en el medio cuando la concentración supere un límite, que es muy inferior al tolerado por el *Cladosporium resinae*.

La corrosión por picado fue verificada mediante microscopía toda vez que el potencial de corrosión del aluminio o de sus aleaciones se encontró por encima del respectivo potencial de picado. En caso contrario se observó corrosión generalizada, con una intensidad de ataque proporcional al grado de proliferación alcanzado.

Se observó que la formación de zonas con aireación diferencial en las probetas sometidas a medios altamente contaminados daban lugar a corrosión localizada en las zonas con acceso de oxígeno restringido. En esos casos el brusco aumento de corriente debido a incremento de potencial anódico, que correspondería al potencial de picado, ocurre más fácilmente (a potenciales menores) que sobre superficies libres de adherencias.

Por eso, el efecto de la fijación de colonias microbianas del hongo sobre el fondo o paredes de un tanque integral acentuaría su tendencia al picado, que se localizaría bajo la colonia. En este caso, también la concentración local de metabolitos deberá ser mayor que en el resto del fondo del tanque, donde el agua sedimentada puede no haber alcanzado la concentración necesaria para que se nucleee el picado. Se observó que la morfología del ataque es la misma en zonas con restringido acceso de oxígeno que la del picado en una chapa libre de adherencias.

En condiciones de servicio, zonas de aleación con su pintura deteriorada pueden actuar como foco de aireación diferencial, nucleándose el ataque selectivo, tipo picado, en lugares que retienen parcialmente el recubrimiento y son accesibles al agua contaminada.

Por ello, al hacer una decontaminación de tanques en los que ocurrió proliferación, además de una adecuada esterilización para eliminar restos de colonias o esporas que los reinfecten, conviene eliminar las zonas en que el recubrimiento se deterioró y repararlo, para asegurar su continuidad y el espesor adecuado.



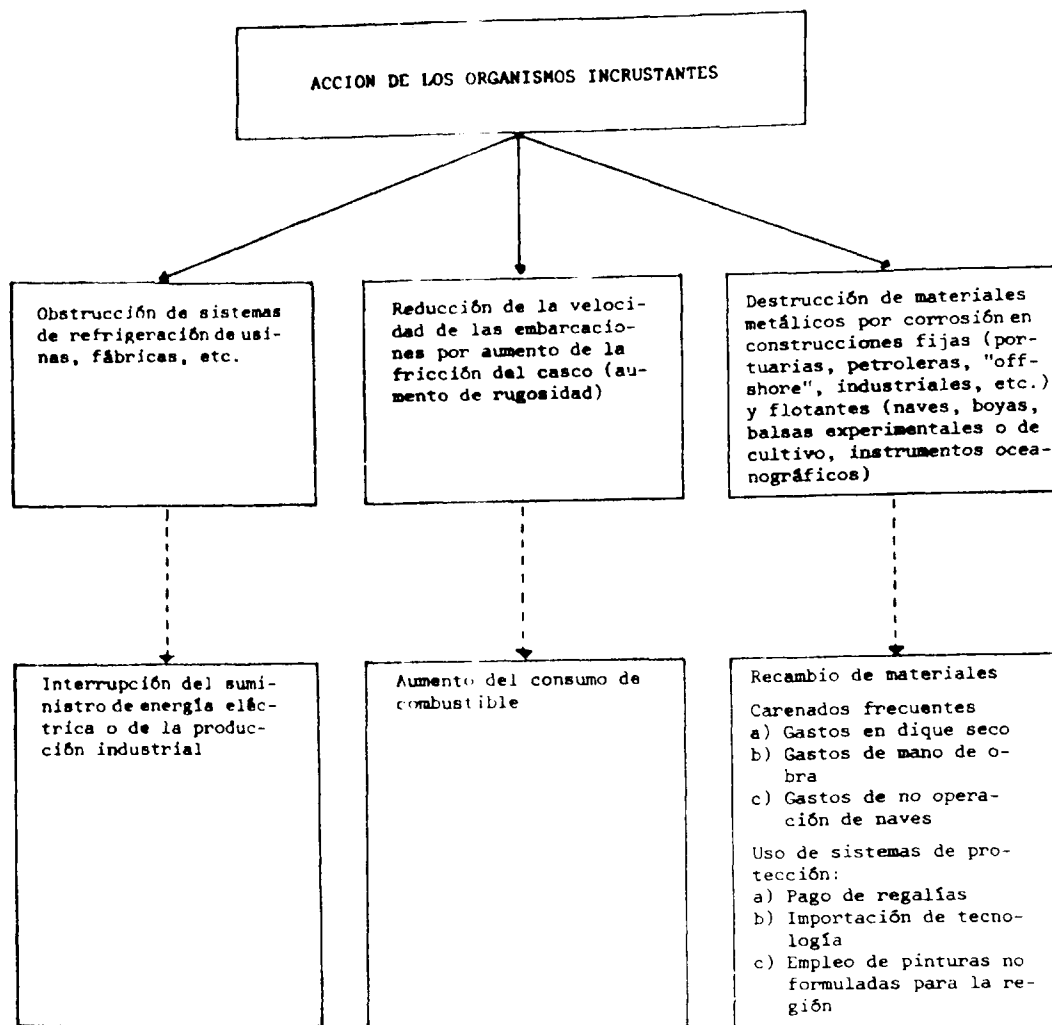
## ACCION DE LAS INCRUSTACIONES BIOLOGICAS O FOULING

Desde tiempos muy remotos, se ha conocido el hecho de que cualquier objeto sumergido en el mar es rápidamente colonizado por organismos de variado tipo. Este fenómeno comenzó a preocupar al hombre principalmente en relación a las embarcaciones, ya que las mismas debían ser carenadas periódicamente para librarlas de adherencias indeseables. En la actualidad, el conjunto de organismos animales y vegetales que colonizan sustratos artificiales se conoce con el nombre de "fouling" o *incrustaciones biológicas* y su estudio ha cobrado gran importancia a nivel mundial.

En primer lugar, cabe analizar la causa de la rápida colonización de cualquier sustrato que se introduce en el mar. En el ambiente marino, existen una *variedad de fondos* en los que habitan animales y vegetales característicos de cada uno de ellos. Estos fondos pueden dividirse en dos grandes tipos: los *fondos blandos* (arenas, fangos, etc.) y los de tipo *duro*, como rocas y tosca. El primer tipo predomina ampliamente sobre el segundo, por lo cual los organismos adaptados a vivir en fondos duros deben competir fuertemente entre sí para obtener un espacio donde fijarse y prosperar. Un gran porcentaje no logra hacerlo y muere durante las primeras etapas de vida, ya que es mayor la cantidad de organismos dispuestos a fijarse que los espacios disponibles para ello. Es por esta razón que cualquier superficie artificial expuesta en el medio marino resulta una interesante alternativa ante la escasez de fondos naturales adecuados.

El *problema del fouling* radica en las consecuencias negativas que ejerce sobre la actividad que el hombre desarrolla en el mar. Por ello, los estudios relacionados con el tema tienden a *diseñar sistemas de control* para evitar la fijación de organismos sobre estructuras sumergidas. Sin embargo, en otros casos el hombre ha sabido aprovechar este fenómeno para beneficio propio, principalmente en relación a *cultivos comerciales de moluscos*. Con este fin, se sumergen sustratos adecuados que incrementan la fijación natural de las especies que se desea obtener (mejillones, ostras, etc.), generalmente con excelentes resultados.

Las consecuencias del fouling son muy variadas, pero sin duda las mejor conocidas son las relacionadas con la industria naviera. Toda embarcación consume una cierta cantidad de combustible que le permite mantener una velocidad óptima y que depende fundamentalmente de la forma del casco. La fijación de organismos sobre la carena produce



una capa de espesor variable que *altera la hidrodinámica de la embarcación*, modificando su normal funcionamiento y produciendo un importante aumento en el consumo de combustible.

Por otra parte, ciertos organismos, mediante su acción mecánica, *ocasionan problemas de corrosión*, que hacen necesario el periódico retiro de las naves en servicio, su instalación en dique seco, el posterior carenado y pintado de las mismas e incluso, en los casos más serios, el recambio de chapas de acero del casco. Este costoso proceso trae como consecuencia la inactividad de la nave, provocando además lucro cesante por falta de operación en los casos de los barcos mercantes y problemas operativos en las embarcaciones de guerra. La acción de los organismos también se verifica sobre estructuras fijas tales como construcciones portuarias, si bien con consecuencias menos graves que las mencionadas.

Esencialmente, el fouling es un *fenómeno vinculado con ambientes portuarios*, ya que el mismo adquiere significativa magnitud

cuando las embarcaciones se encuentran *fondeadas* en dichas áreas.

Esto obedece a varios factores: primeramente, debe considerarse que la mayor parte de los organismos incrustantes al estado adulto, poseen estructuras especiales que les permiten vivir adheridos a un sustrato o en íntimo contacto con él. A partir de su nacimiento, estos organismos atraviesan por una serie de estados larvales muy diferentes a los adultos en su morfología y forma de vida. Se trata de larvas microscópicas, planctónicas, que viven suspendidas en la masa de agua y permanecen allí un cierto tiempo. Finalizada la etapa larval y en presencia de un sustrato adecuado, estas larvas se fijan y sufren una serie de cambios hasta transformarse en individuos adultos. El *proceso de fijación* se ve *dificultado* cuando el sustrato se encuentra en movimiento, como en el caso de una embarcación en navegación y en cambio, se ve *facilitado* durante los períodos de inactividad de la nave y en aguas poco agitadas, condiciones que se conjugan en el interior de los puertos.

Otro factor a tener en cuenta es la *alta productividad* que caracteriza a las zonas portuarias, y que se debe en gran medida a la eliminación de *desechos industriales y domésticos* en sus aguas. Estos desechos representan un aporte adicional de materia orgánica que, siempre que no exceda ciertos límites, constituye una importante fuente de alimento para numerosos organismos y contribuye a un acelerado desarrollo de los mismos. A ello debe sumarse que, aún en condiciones naturales, las aguas costeras suelen ser más productivas que las correspondientes a zonas de mar abierto. En estas últimas, la densidad de larvas de organismos de fondos duros es significativamente menor que en zonas costeras.

En aguas abiertas, el fouling está relacionado fundamentalmente con estructuras diversas, tales como construcciones "off-shore", boyas oceanográficas, viviendas y estaciones submarinas, si bien su incidencia es menor que en zonas de puertos por los motivos mencionados anteriormente.

Los problemas creados por organismos incrustantes pueden ser agrupados en dos tipos: a) aquellos que resultan de la *fijación de organismos marinos en el exterior de las estructuras* y b) los que resultan de la *fijación de organismos en el interior de cañerías* o sectores igualmente inaccesibles de plantas industriales o de energía. Los primeros ya han sido comentados en los puntos precedentes y se vinculan fundamentalmente con cascos de embarcaciones y estructuras sumergidas de diverso tipo.

En cuanto a la segunda categoría, el problema del fouling adquiere especial importancia en el caso de centrales de energía o plantas industriales de otro tipo que utilizan agua de mar en sus sistemas de refrigeración. La obstrucción de estos sistemas por *fijación de organismos en el interior de las tuberías* trae aparejado



un elevado costo adicional debido fundamentalmente a la necesidad de interrumpir el funcionamiento de la planta para su limpieza periódica. Además, algunos organismos con caparazones duros (por ejemplo mejillones) pueden desprenderse e introducirse en los tubos de condensación induciendo procesos de corrosión por aireación diferencial, que causan perforaciones en dichos tubos. Un problema similar se presenta en las embarcaciones que utilizan agua de mar en sus circuitos de refrigeración.

El control del fouling en embarcaciones se realiza por medio de pinturas, tal como se indica en el capítulo correspondiente.

En el caso de las centrales refrigeradas con agua de mar se utilizan sustancias tóxicas incorporadas al agua que ingresa en la toma, en forma intermitente. El cloro es la más frecuentemente empleada. Otro sistema consiste en revertir periódicamente el flujo del agua circulante, de forma que los organismos adheridos se vean sujetos a temperaturas elevadas y mueran.

## ESTUDIO DEL FOULING

Un paso preliminar para encarar este estudio es el *relevamiento de las comunidades portuarias*, ya que los organismos incrustantes son esencialmente similares a los que pueden encontrarse en estas construcciones y en fondos duros de áreas naturales aledañas. Un panorama de estas comunidades puede servir como patrón de referencia para evaluar la incidencia del fouling, principalmente en relación con los sistemas de control.

Un segundo método y el más difundido en la actualidad es el *empleo de paneles experimentales suspendidos en balsas* diseñadas a tal efecto. Este tipo de investigaciones ha sido particularmente útil para obtener información sobre el desarrollo de las comunidades incrustantes. Estas comunidades sufren una sucesión de cambios desde la colonización inicial de la superficie original y limpia del panel hasta alcanzar un estado de complejidad y estabilidad denominado *climax*, que es característico de cada zona. La secuencia de colonización sobre paneles experimentales puede completarse en unos pocos meses o en un año y transcurre mucho más rápidamente en los ambientes portuarios que en las áreas naturales.

En los estudios en los cuales los paneles permanecen sumergidos sólo por períodos mensuales, puede observarse que las diferentes especies tienen un período de fijación característico, relacionado con su ritmo estacional de reproducción. Estos cambios estacionales son más marcados en aquellas zonas que presentan fluctuaciones notables en la temperatura del agua a lo largo del año, como es típico en las regiones templadas. En estas zonas el fouling es más intenso durante el verano, mientras que durante la estación fría la fijación es escasa.

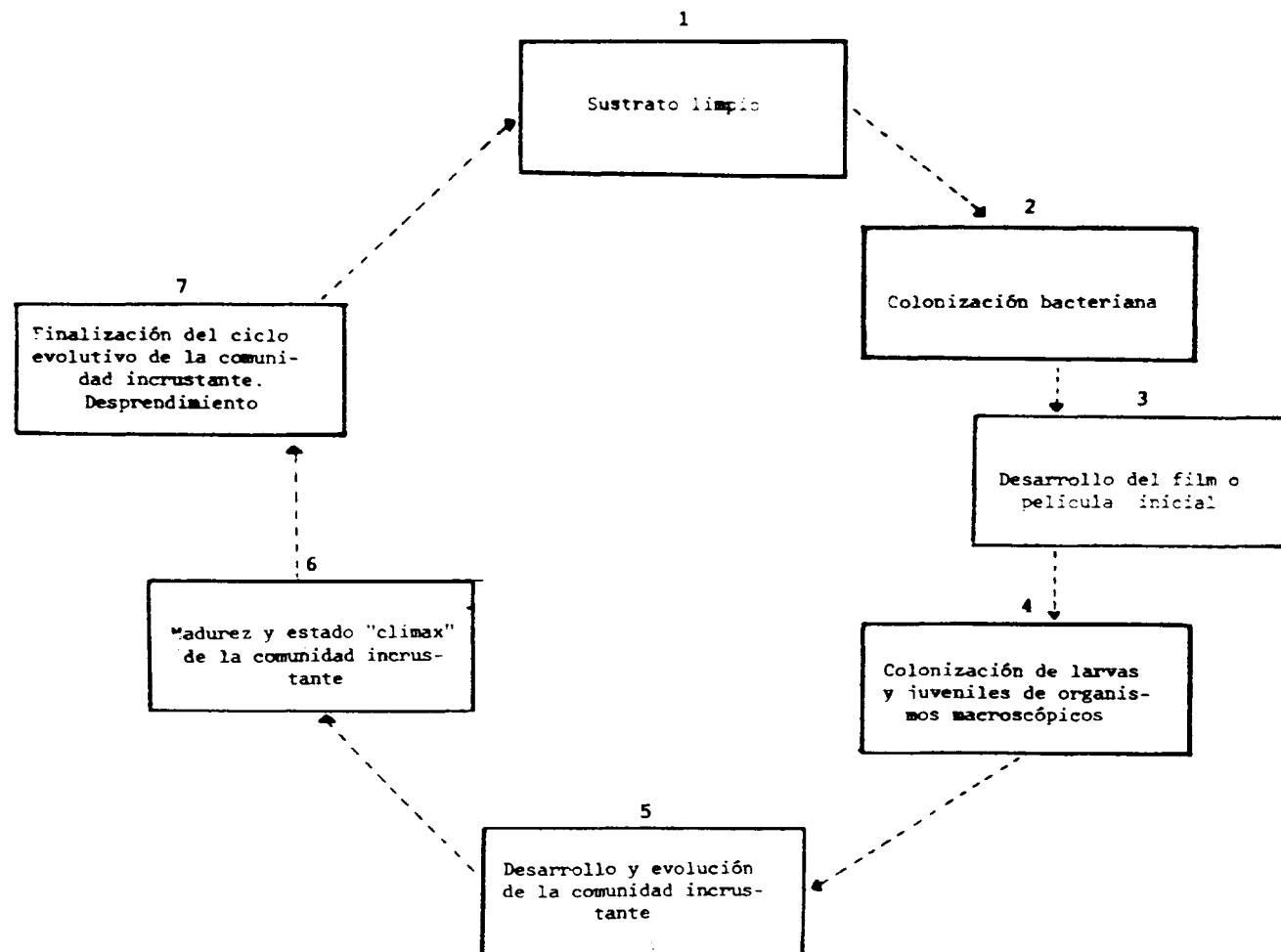


Si bien las comunidades incrustantes de cualquier puerto que se considere presentan rasgos propios, es posible detectar ciertos aspectos comunes entre ellas. Por una parte, las especies de distribución geográfica amplia o cosmopolita pueden estar presentes en casi todos los puertos del mundo; por otra parte, las comunidades incrustantes, al margen de la ubicación geográfica, atraviesan por una serie de etapas semejantes en su desarrollo.

El esquema adjunto representa en forma simplificada los pasos que se suceden en el desarrollo de las incrustaciones biológicas, independientemente de las especies presentes durante cada uno de ellos. Cabe mencionar que el tiempo que transcurre entre una etapa y otra puede ser variable, dependiendo de la ubicación geográfica de la zona considerada, las características ambientales (temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, grado de contaminación, etc.) y la época del año.

Así, en el puerto de Mar del Plata, que corresponde a una zona con claras variaciones de temperatura a lo largo del año, se observan diferencias estacionales en el tiempo de desarrollo de las comunidades incrustantes. Si la inmersión del sustrato se realiza en la época estival, el ciclo evolutivo puede cumplirse en tres meses, mientras que si la experiencia se inicia en otoño-invierno, su duración se puede extender por seis meses o más.

Como puede observarse en el esquema, luego de cierto tiempo la comunidad comienza a desprenderse, iniciándose un nuevo ciclo de colonización. Esto debe tenerse en cuenta en la evaluación de sistemas de control antiincrustantes, ya que la observación de zonas con fijación escasa o nula podría inducir a conclusiones erróneas sobre el funcionamiento de los mismos, si no se conocen paralelamente los períodos de desprendimiento y recolonización.



ETAPAS PRINCIPALES EN EL DESARROLLO DE LAS COMUNIDADES INCRUSTANTES

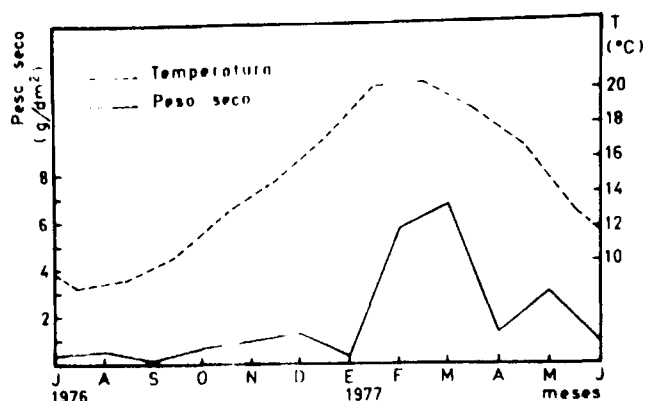


Figura 28.- Fluctuaciones estacionales del fouling de zonas templadas en función de la temperatura del agua

Un tercer método se basa en el análisis del casco de las embarcaciones, para lo cual se establece la fijación de organismos sobre diferentes partes del casco que presentan condiciones ecológicas diferentes. Esta información se complementa con los movimientos e itinerarios del buque y con el tipo de pinturas antiincrustantes empleadas.

Los estudios sobre fouling y sistemas de control a nivel mundial han sido encarados en forma profunda en las últimas décadas. En las épocas en que predominaban las embarcaciones construidas en madera el problema se limitaba a la *alteración de la hidrodinámica del casco* pero cuando comenzaron a predominar las naves con cascos de acero a dichos inconvenientes se sumaron los relacionados con los *problemas de corrosión* producidos por la fijación de organismos.

#### ORGANISMOS QUE COMPONEN LAS COMUNIDADES INCRUSTANTES

Entre los mismos se encuentran representantes de prácticamente todos los grupos de plantas e invertebrados marinos, desde simples organismos unicelulares hasta otros de organización muy compleja. Sin embargo, en muchas partes del mundo los organismos dominantes pertenecen a unos pocos géneros y especies, que resultan los mejor adaptados a las condiciones particulares en las que se desarrollan las incrustaciones biológicas.

La amplia distribución a nivel mundial de los organismos incrustantes puede deberse al hecho de que son transportados por las embarcaciones y así se van estableciendo en áreas diferentes.

##### 1. BACTERIAS

Son organismos microscópicos que viven tanto en el mar y ríos

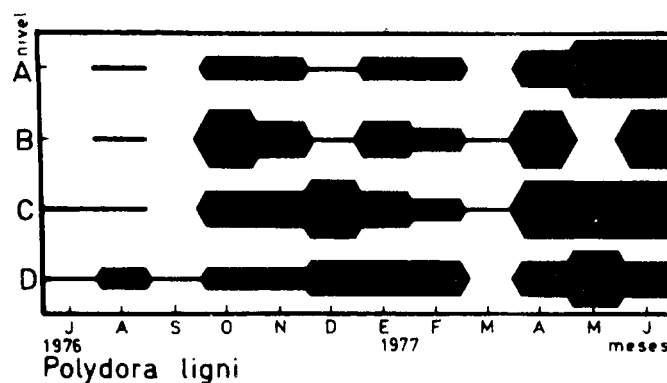
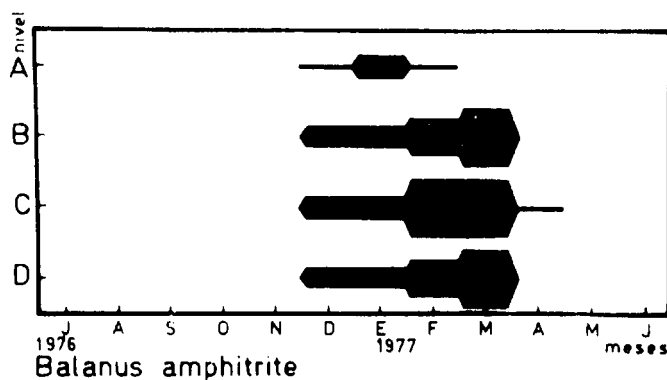
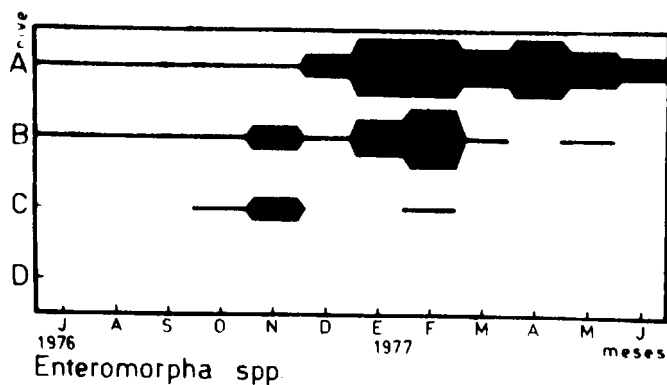


Figura 29.- Los ciclos de fijación de las diferentes especies que componen el fouling suelen graficarse como se observa a la izquierda. Sobre la ordenada se indican los diferentes niveles de profundidad de los paneles de la balsa experimental, correspondiendo el A a línea de flotación y D al más profundo de carena. Los diferentes grosores de trazo representan el grado de abundancia relativa en la fijación. El ciclo del alga verde *Enteromorpha* es de clara estratificación vertical, en donde la densidad va disminuyendo desde la superficie hasta el nivel C, debido a los requerimientos luminosos de estos vegetales; el cirripedio *Balanus amphitrite* es un ejemplo típico de fijación estacional vinculada con la temperatura del agua; el correspondiente al anélido *Polydora ligni* es de tipo anual, con fijación en todos los meses del año

como en la tierra y aire, resistiendo en la mayoría de los casos condiciones ambientales extremas que producirían la muerte de cualquier organismo superior. Por esta razón pueden vivir en cualquier tipo de ambiente y existe un grupo que no requiere luz ni oxígeno (bacterias anaeróbicas).

Las bacterias son los primeros organismos que colonizan cualquier objeto sumergido en el medio marino, formando una delgada película. Dado que se reproducen por simple división y a gran velocidad, en un breve lapso la superficie expuesta se encuentra cubierta por millones de bacterias. La película bacteriana, casi imperceptible a simple vista, promueve la fijación de otros organismos, creando condiciones favorables para su adhesión o brindando una fuente de alimento. Incluso puede actuar como protección para ciertos organismos, aislándolos de la acción de los tóxicos de las pinturas.

En las zonas del casco donde la película protectora se rompe, puede producirse corrosión, que se extiende rápidamente debajo de la misma. Esta corrosión se caracteriza por la presencia de un depósito negro de sulfuro de hierro. El proceso es anaeróbico (es decir transcurre en ausencia de oxígeno) y en él se encuentran involucradas las bacterias reductoras del azufre (*Desulphovibrio* spp.). Anteriormente se creía que las cepas de bacterias que contenían hidrogenasas producían una despolarización catódica del hierro. Más recientemente se ha propuesto que la principal contribución de las bacterias reductoras del azufre es la formación de ácido sulfhídrico que, junto con otros compuestos de azufre, actuaría en los procesos de corrosión del metal.

## 2. DIATOMEAS

Se trata de algas muy simples, microscópicas y unicelulares, que poseen una cubierta externa de sílice. Pueden encontrarse como individuos aislados o formando colonias de variados tipos. Dado que son organismos vegetales son capaces de sintetizar materia orgánica en presencia de luz y sales minerales. Son fundamentales en el ambiente marino donde constituyen el primer eslabón en la cadena de alimentos y los principales productores de oxígeno. Forman también parte de la película inicial, junto con las bacterias.

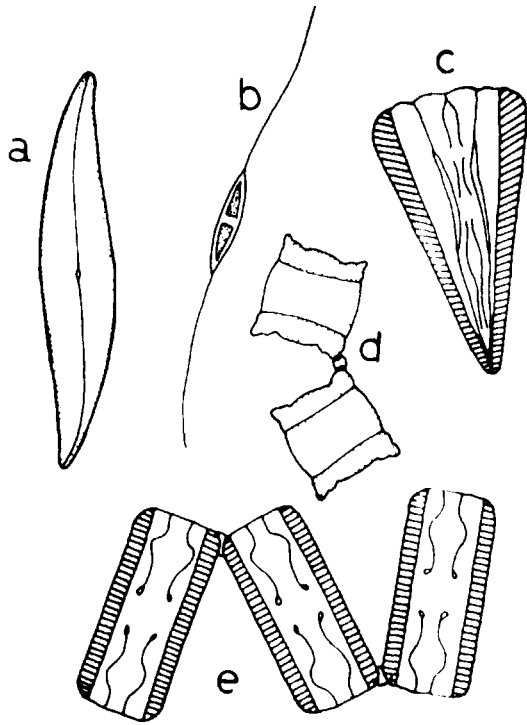


Figura 30.- Diatomeas, componentes microscópicos del fouling: (a) *Synedra*; (b) *Nitzschia*; (c) *Licmophora*; (d) *Biddulphia*; (e) *Grammatophora*

## 3. CIANOFITAS

Representan un grupo de algas de organización muy simple, microscópicas, de coloración azul verdosa. Son resistentes a cambios en los factores ambientales (salinidad, temperatura, grado de humedad, etc.) y a la acción de los tóxicos; se presentan frecuentemente como incrustaciones en barcos y en construcciones portuarias.

## 4. CLOROFITAS

Son las algas superiores más importantes del fouling. En algunos casos son unicelulares, si bien la mayoría son pluricelulares, de ta-

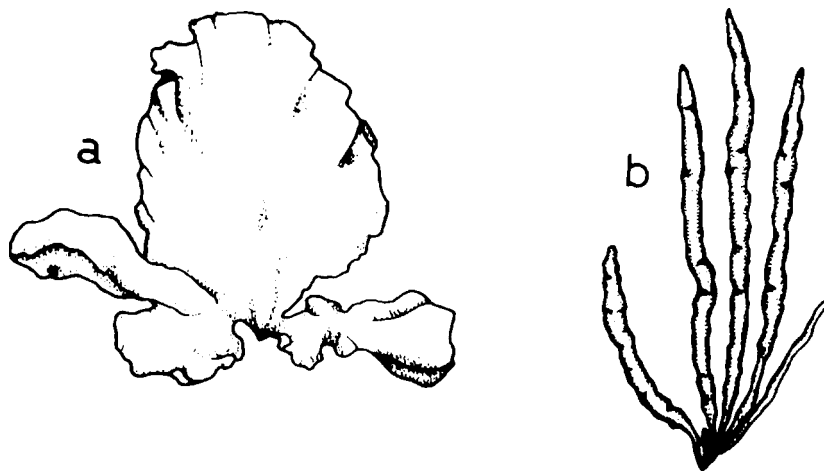


Figura 31.- Algas verdes: (a) Ulva; (b) Enteromorpha

maño macroscópico y de forma variada. Son organismos fotosintetizantes que se desarrollan en zonas bien iluminadas. En el caso de embarcaciones, las clorofitas *forman un cinturón a nivel de línea de flotación*. Son de crecimiento rápido y muy resistentes a los tóxicos de las pinturas (figura 31).

#### 5. PROTOZOOS

Son animales unicelulares, de organización muy simple. Su tamaño puede variar desde micrones hasta algunos milímetros y pueden ser sésiles o de vida libre. Se reproducen y desarrollan con gran facilidad y en muy corto tiempo. Colonizan las superficies sumergidas casi inmediatamente luego de la fijación de las bacterias y diatomeas, que constituyen su principal alimento. Son a su vez utilizados como fuente de alimentación por numerosos organismos que le suceden en la colonización, especialmente por las larvas de casi todos los invertebrados marinos.

#### 6. CELENERADOS

Se trata de organismos simples, cuyas células se encuentran organizadas en tejidos. Las diversas especies e incluso una misma especie en diferentes etapas de su vida incluyen formas de dos tipos: una de vida libre y otra fija (medusa y pólipo). Los organismos correspondientes a esta última pueden ser de vida solitaria, como las anémonas de mar, o formar colonias arborescentes y muy ramificadas. Son de crecimiento acelerado y constituyen un problema muy serio en el caso de centrales de energía, donde pueden llegar a obstruir los sistemas de refrigeración.

#### 7. ANELIDOS (Poliquetos)

Estos animales poseen un cuerpo alargado, de aspecto vermiforme, segmentado, con estructuras pares que utilizan para desplazarse.

Figura 32.-  
 Protozoos: (a) Forami-  
 nifero; (b) Ciliado sé-  
 sil solitario (Vortice-  
 lla); (c) Ciliado libre;  
 (d) Foliculnido; (e)  
 Tintínido; (f) Ciliado  
 sésil colonial (Zootham-  
 nium)

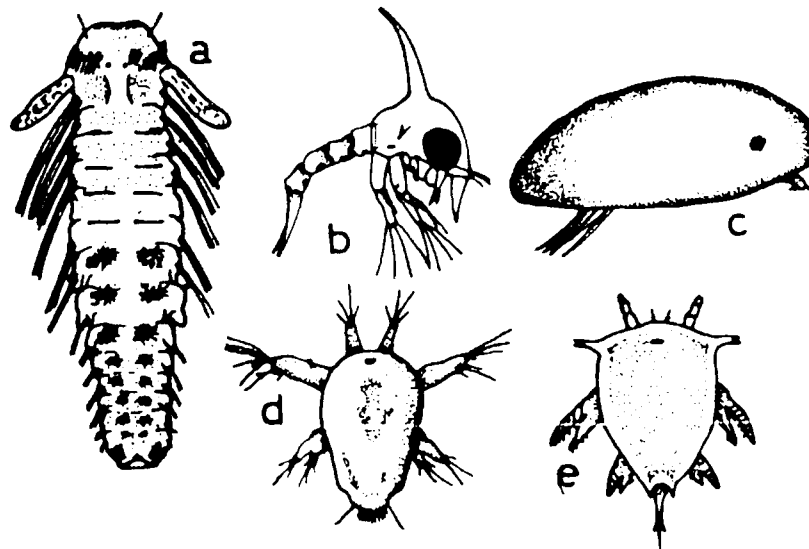
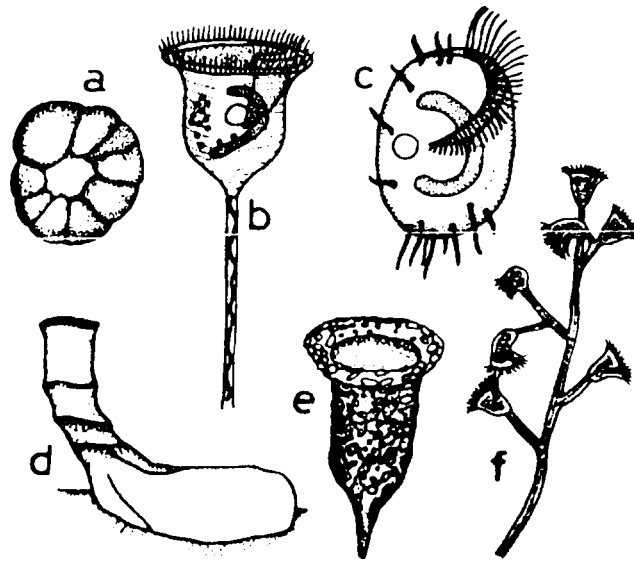


Figura 33.- La mayoría de las especies del fouling, previamente a su fijación, atraviesan por estadios larvales microscópicos que presentan formas y hábitos de vida muy diferentes a los de los adultos según puede observarse en la figura: a) larva del anélido *Polydora*; b) larva (zoea) del cangrejo *Cyrtograpsus*; c) larva (cypris) del cirripedio *Balanus* correspondiente al estadio previo a la fijación; d) larva (nauplius) de copépodo; e) larva (nauplius) del cirripedio *Balanus* correspondiente a un estadio más temprano que el ilustrado en c

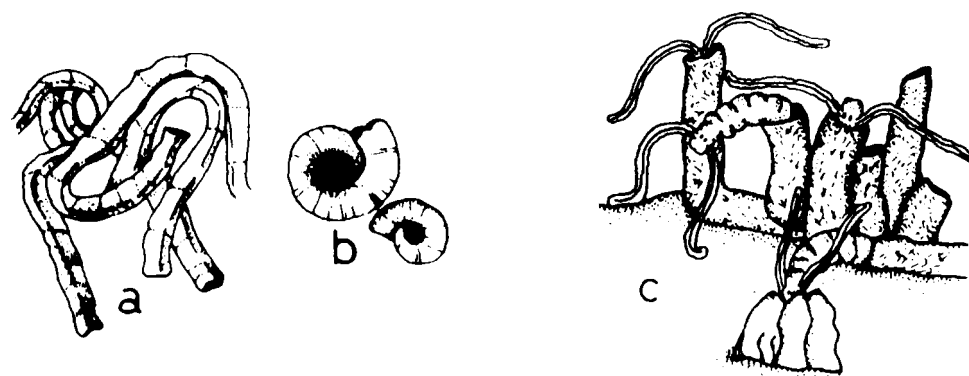


Figura 34.- Anélidos (poliquetos): (a) Mercierella; (b) Spirorbis; (c) Polydora

se. Los poliquetos son anélidos que viven exclusivamente en el ambiente marino y son conocidos vulgarmente como "gusanos de mar". De acuerdo a su forma de vida pueden agruparse en errantes y en sedentarios. Los primeros son capaces de desplazarse sobre el fondo, mientras que los segundos viven dentro de tubos calcáreos que ellos mismos secretan. Estos últimos son los más perjudiciales para las estructuras sumergidas ya que los tubos se adhieren fuertemente a los distintos sustratos y no se desprenden fácilmente.

## 8. MOLUSCOS

Constituyen uno de los grupos más numerosos del reino animal y es en el ambiente marino donde han alcanzado su mayor desarrollo. Se caracterizan por poseer un cuerpo blando, protegido por una conchilla calcárea que adopta diversas formas según los grupos. La gran mayoría de las especies viven relacionadas con los fondos marinos.

Entre las especies importantes en el fouling pueden mencionarse las lapas y los mejillones. Estos últimos constituyen serios problemas en las centrales eléctricas pues se adhieren fuertemente a las tuberías mediante unos filamentos especiales y por otra parte los adultos son muy resistentes al tratamiento con cloro.

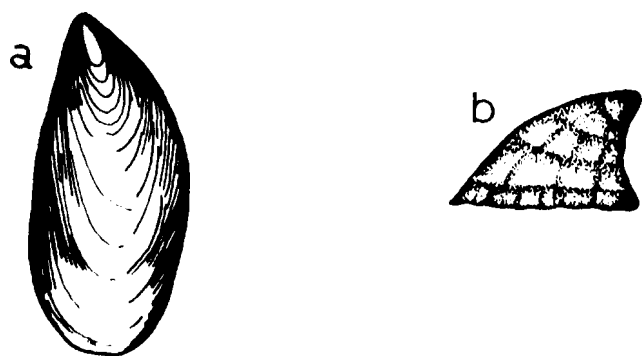


Figura 35.- Moluscos: (a) El mejillón Mytilus; (b) la lapa Siphonaria

## 9. CRUSTACEOS

Se trata de organismos cuyos cuerpos se encuentran recubiertos por una capa de quitina. Esta cu-



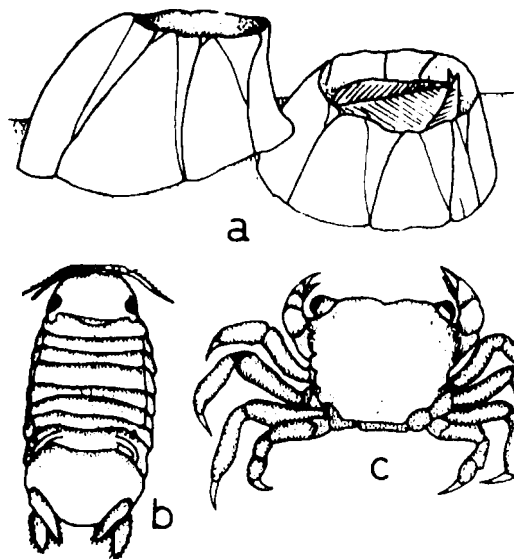


Figura 36.- Crustáceos: (a) Balanus; (b) Sphaeroma; (c) Cyrtograpsus

bierta es articulada y es reemplazada periódicamente por una nueva a medida que el animal crece. Son de hábitos muy variados y su tamaño oscila entre menos de 1 mm hasta 3,5 metros en los casos extremos.

Los crustáceos relacionados con las incrustaciones pertenecen a distintos grupos y ofrecen características muy diversas. El grupo más importante en relación con el fouling está constituido por los cirripedios o "dientes de perro". Son organismos totalmente adaptados a la vida sésil, que viven dentro de

una cubierta calcárea. Poseen larvas de vida libre, que luego se fijan, sufriendo una serie de transformaciones hasta llegar al estado adulto. Los individuos adultos viven permanentemente fijados, batiendo el agua con sus apéndices para crear corrientes y obtener así su alimento. Son organismos de crecimiento rápido y si bien su vida suele ser relativamente breve, su cápsula calcárea permanece adherida aún después de su muerte.

Los cirripedios se cuentan entre los organismos incrustantes más comunes y ciertamente entre los más perjudiciales. Algunas especies son muy resistentes a la acción de los tóxicos y una vez adheridos resulta muy difícil desprenderlos. Debido a su forma particular de crecimiento son capaces de romper la película de pintura sobre la cual se fijan, acelerando de esta forma la corrosión del casco.

#### 10. BRIOZOOS

Este es un grupo de animales sésiles, coloniales, conocidos como animales musgo, ya que sus colonias en muchos casos tienen el aspecto de vegetales. La mayoría de las especies son marinas y las colonias están constituidas por individuos unidos entre sí de diferentes maneras. Cada uno de ellos consiste en una cubierta protectora en el interior de la cual vive un pequeño pólipo. Esta cubierta puede ser de consistencia blanda o encontrarse total o parcialmente calcificada.

Las colonias exhiben una gran variedad de formas y hábitos. Algunas son de tipo erecto, ramificado, constituyendo densas matas; o-

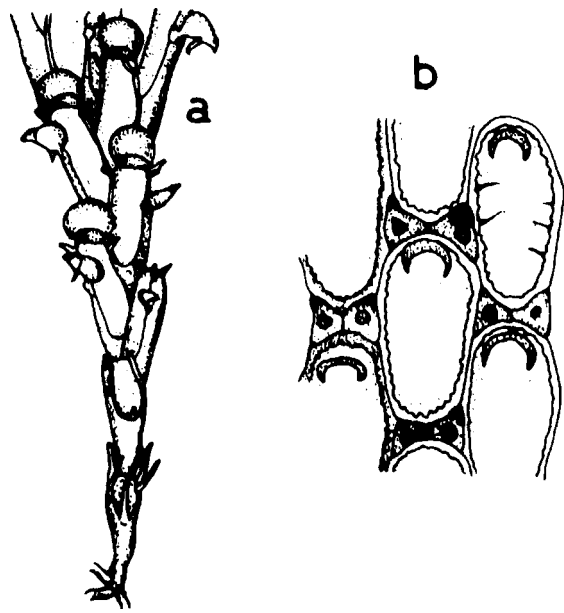
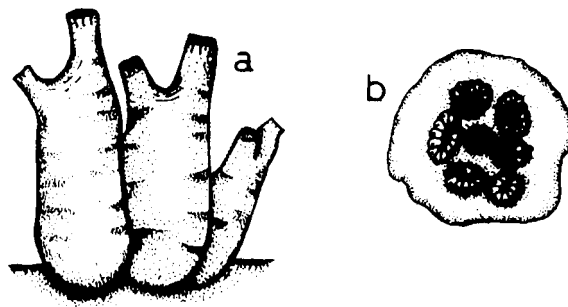


Figura 37.- Briozoos:  
(a) Bugula; (b) Cono-  
peum

Figura 38.- Tunicados:  
(a) Ciona; (b) Botry-  
llus



tras son de tipo incrustante y se adhieren al sustrato formando una capa blanda o calcárea.

Los briozoos son organismos de rápido crecimiento, que llegan a dominar ciertas etapas en el desarrollo de la comunidad; muchos de ellos son resistentes a los tóxicos. Además de formar densas matas sobre los cascos de las embarcaciones aumentando la resistencia friccional, en el caso de las colonias incrustantes de tipo calcáreo forman una capa que cubre grandes sectores y sobre la cual pueden fijarse otros organismos más perjudiciales.

## 11. TUNICADOS

Son organismos que viven exclusivamente en el ambiente marino distribuyéndose desde los polos hasta los trópicos. Muchas especies son costeras, mientras que otras habitan hasta los 5000 metros de profundidad. El tamaño de las diversas especies es variable, desde microscópico hasta 30 cm de diámetro.

Los tunicados se dividen en varios grupos, interesando en relación al fouling aquellos pertenecientes a la clase de las ascidias o "papas de mar". Los ejemplares adultos de este grupo, si bien presentan el aspecto de invertebrados, constituyen un grupo que se separa claramente de ellos y que se conoce bajo la denominación de cordados.

Las ascidias pueden ser solitarias o coloniales. Las primeras son generalmente de forma cilíndrica y globulosa y suelen adherirse al sustrato por su base. Otras ascidias viven agrupadas formando especies de colonias que macroscópicamente presentan un aspecto gelatinoso o coriáceo.

Las ascidias son típicos componentes del fouling de casi todos los puertos del mundo y presentan, en general, un crecimiento acelerado, pudiendo alcanzar en un par de meses la talla máxima.

Desde el punto de vista aplicado las ascidias no presentan mayores problemas ya que pueden ser eliminadas fácilmente con pinturas tóxicas.

# PINTURAS

## DEFINICIONES Y COMPONENTES MAS IMPORTANTES

Una pintura está constituida por tres componentes fundamentales: el *pigmento*, el *ligante* y los *disolventes* y *diluyentes*.

El *pigmento* es un sólido finamente dividido, que se mantiene dispersado en forma estable en el seno de la masa total y que proporciona a la película su color característico, poder cubritivo, resistencia a la intemperie y eventualmente propiedades anticorrosivas.

El *ligante* es la sustancia formadora de la película y responsable del pasaje de líquido a sólido que tiene lugar cuando la pintura es extendida en forma de capa fina; puede ser un aceite, un barniz o una resina.

Los *disolventes* que se incorporan a una formulación tienen por función disolver el aceite o la resina, posibilitando así el proceso de elaboración de la pintura. Los *diluyentes*, que no actúan como disolventes de la resina, permiten "adelgazar" o diluir la pintura, reduciendo costos de fabricación y facilitando su aplicación.

Las pinturas incluyen además en su formulación componentes menores o *aditivos*, con funciones específicas: *secantes*, destinados a acelerar el proceso de secado; *plastificantes*, para incrementar la flexibilidad de la película; *espesantes*, para aumentar la viscosidad; etc.

Un producto no pigmentado se denomina *barniz* y proporciona una cubierta transparente, actuando también como protector de la superficie de base. Se emplea fundamentalmente para el recubrimiento de la madera en interiores y exteriores. La resistencia de un producto no pigmentado es menor que la de una pintura, por su sensibilidad a la acción de la radiación ultravioleta de la luz solar.

Las *características de la pintura en el envase* deben ser tales que permitan su fácil aplicación a pincel o a rodillo, pudiendo ser diluida para el pintado a soplete. La película deberá secar dentro de los lapsos establecidos en las especificaciones respectivas.

Tendrá buena *estabilidad*, en condiciones normales de almacena-

miento, manteniendo sus características durante lapsos no inferiores a un año. Todo asentamiento del pigmento deberá ser reincorporado fácilmente por agitación con espátula o con cualquier otro utensilio adecuado, debiéndose desechar los productos que muestren alteraciones pronunciadas, índice de reacciones químicas producidas con posterioridad al proceso de fabricación (por ejemplo la reacción entre un pigmento básico y un ligante ácido, que produce espesamiento).

Los pigmentos que se emplean en la elaboración de pinturas deberán tener buena estabilidad a la luz aún cuando el producto sea destinado a interiores. El vehículo deberá proporcionar una película de adecuada flexibilidad y adhesividad, que asegure larga vida útil y buen poder protector.

#### CLASIFICACION DE LAS PINTURAS MARINAS DE ACUERDO A SU EMPLEO

*Pinturas para exterior o para superestructura* (figura 37). Son aquellas que por su buena resistencia a los agentes atmosféricos se utilizan en la parte estructural del barco, por encima de la cubierta principal.

*Pinturas para casco*. Son pinturas que combinan una buena resistencia al exterior con satisfactorio comportamiento en contacto eventual con el agua.

*Pinturas para línea de flotación*. Son aquellas que deben tener simultáneamente buena resistencia a la intemperie y al agua, pudiendo poseer o no propiedades antiincrustantes.

*Pinturas antiincrustantes*. Se emplean en la protección de la carena y deben tener efecto tóxico sobre los organismos incrustantes ("fouling"), evitando su fijación y posterior desarrollo.

#### CLASIFICACION DE LAS PINTURAS SEGUN SU PROPIEDAD MAS IMPORTANTE

*Shop-primers, prefabrication primers o imprimaciones de protección temporaria*. Son las pinturas destinadas a la protección del acero durante el período de construcción de una estructura. Se aplican a soplete, tienen secado muy rápido y no deben interferir en los procesos de soldadura ni producir humos tóxicos cuando la película quema como consecuencia de la llama. Deben tener buena resistencia a la intemperie y ser compatibles con los esquesmas de pintado que se utilizarán posteriormente. Pueden ser elaboradas con pigmentos anticorrosivos o con polvo de cinc (*zinc rich primers*).

*Wash-primers* o *imprimaciones de lavado*. Son productos destinados a ser aplicados sobre el acero limpio (decapado, granallado, arenado). *Reaccionan químicamente con el mismo* (condición que no produce ningún otro tipo de pintura), pasivándolo y haciéndolo menos sensible a la corrosión. Sirven de base para la aplicación del esquema anticorrosivo, el que eventualmente puede no incluirlos.

*Pinturas anticorrosivas* o *fondos anticorrosivos*. Son las pinturas constituidas por un pigmento anticorrosivo y un ligante y que por diferentes mecanismos contribuyen a proteger el acero contra la corrosión.

*Pinturas intermedias*. Son las que se aplican sobre los fondos anticorrosivos y no contienen pigmentos inhibidores. Se utilizan para incrementar el espesor total y la impermeabilidad de la película, sin aumentar exageradamente los costos.

*Pinturas de terminación*. Constituyen la capa final, que protege a las anteriores; debe tener buena resistencia al medio agresivo (intemperie, agua o reactivos químicos, según el uso de la pintura).

La aplicación de estas pinturas en forma sucesiva, constituye un *sistema o esquema de pintado*. El espesor total depende del número de capas aplicadas y debe incrementarse en relación directa con la agresividad del ambiente que rodea al material que se desea proteger. Un esquema de pintado para carena se presenta en la figura 37.

## CLASIFICACION DE LAS PINTURAS SEGUN EL LIGANTE

*Pinturas al aceite*. El ligante está constituido por un aceite secante (linaza, tung, ricino deshidratado), refinado (decolorado, neutralizado) y generalmente tratado por calentamiento (espesado o polimerizado). Son resistentes a la intemperie pero de secado algo lento, por lo que no son aconsejables para el pintado de embarcaciones.

*Pinturas oleorresinosas*. Los pigmentos están dispersados en un barniz que se obtiene por tratamiento térmico conjunto de un aceite secante y una resina de características adecuadas. Esta resina puede ser natural o sintética, siendo las sintéticas las más empleadas. Secan más rápidamente que las anteriores y su resistencia a la intemperie es variable, dependiendo de las materias primas empleadas. Estas pinturas no son aconsejables para el pintado de materiales o estructuras expuestas a medios muy agresivos.

*Esmaltes alquídicos*. El ligante es una resina alquídica combinada con un aceite secante. Tienen muy buena durabilidad al exterior cuando las pinturas se formulan con este fin y pueden ser utilizadas en el pintado de estructuras próximas a la costa o en la superestructura de buques. Son de secado rápido y compatibles con otras

resinas (esmaltes alquid-fenólicos, alquid-vinílicos, etc.).

*Pinturas fenólicas.* Para la elaboración del ligante se emplean resinas fenólicas puras o modificadas. Tienen buena resistencia al exterior (retención de brillo inferior al de las pinturas alquídicas) y una resistencia al agua mayor que la de los tipos mencionados anteriormente. Se emplean en pinturas anticorrosivas para cascos, pinturas intermedias y pinturas para línea de flotación.

*Pinturas bituminosas.* Son formuladas con betunes asfálticos o con cortes de alquitrán de hulla, procesados o no con un aceite vegetal. Son de color negro, poco resistentes a la acción de la intemperie pero mucho a la del agua y reactivos químicos. Pueden contener pigmentos de carga y secan rápidamente.

*Pinturas de caucho clorado.* El ligante está elaborado con resina de caucho clorado, con un plastificante adecuado. Son muy resistentes al agua, a los agentes químicos, a la intemperie y pueden ser empleadas tanto en formulaciones para casco como para superestructura. Secan muy rápidamente.

*Pinturas vinílicas.* Son las formuladas con resinas vinílicas y se caracterizan por su buena resistencia al agua, a agentes químicos (diluidos) y a la intemperie. Dentro de este tipo de pinturas pueden incluirse tanto fondos anticorrosivos como pinturas de terminación; el esquema debe estar constituido por pinturas vinílicas exclusivamente, ya que no adhieren o tienen poca adherencia sobre otras pinturas. Secan al aire muy rápidamente lo que hace difícil su aplicación a pincel o rodillo en grandes superficies; en este caso se aconseja el pintado a soplete.

*Pinturas poliuretánicas.* Son formuladas con resinas poliuretánicas y se presentan normalmente para su uso en forma de dos componentes, la base pigmentada y el catalizador o agente de curado, que deben ser mezclados antes de la aplicación. El polímero se forma así "in situ" y la película tiene una resistencia muy grande, tanto al exterior como al agua y agentes químicos. Pueden ser pigmentadas en los colores más diversos y secan rápidamente. Algunas formulaciones pueden no contener solventes.

*Pinturas epoxídicas.* El ligante es una resina epoxídica formada también por combinación, en el momento de su uso, de dos componentes (el peso molecular inicial es bajo y la polimerización ocurre como consecuencia de una reacción química entre los mencionados componentes). Secan rápidamente pero sólo después de algunos días la reacción se completa y la película adquiere su máxima resistencia frente al agua y agentes químicos. Son deteriorables por acción de la luz solar, por lo que no se aconseja su utilización en exteriores, salvo que el fabricante indique explícitamente que corresponden a una nueva generación de resinas epoxídicas que cumplen

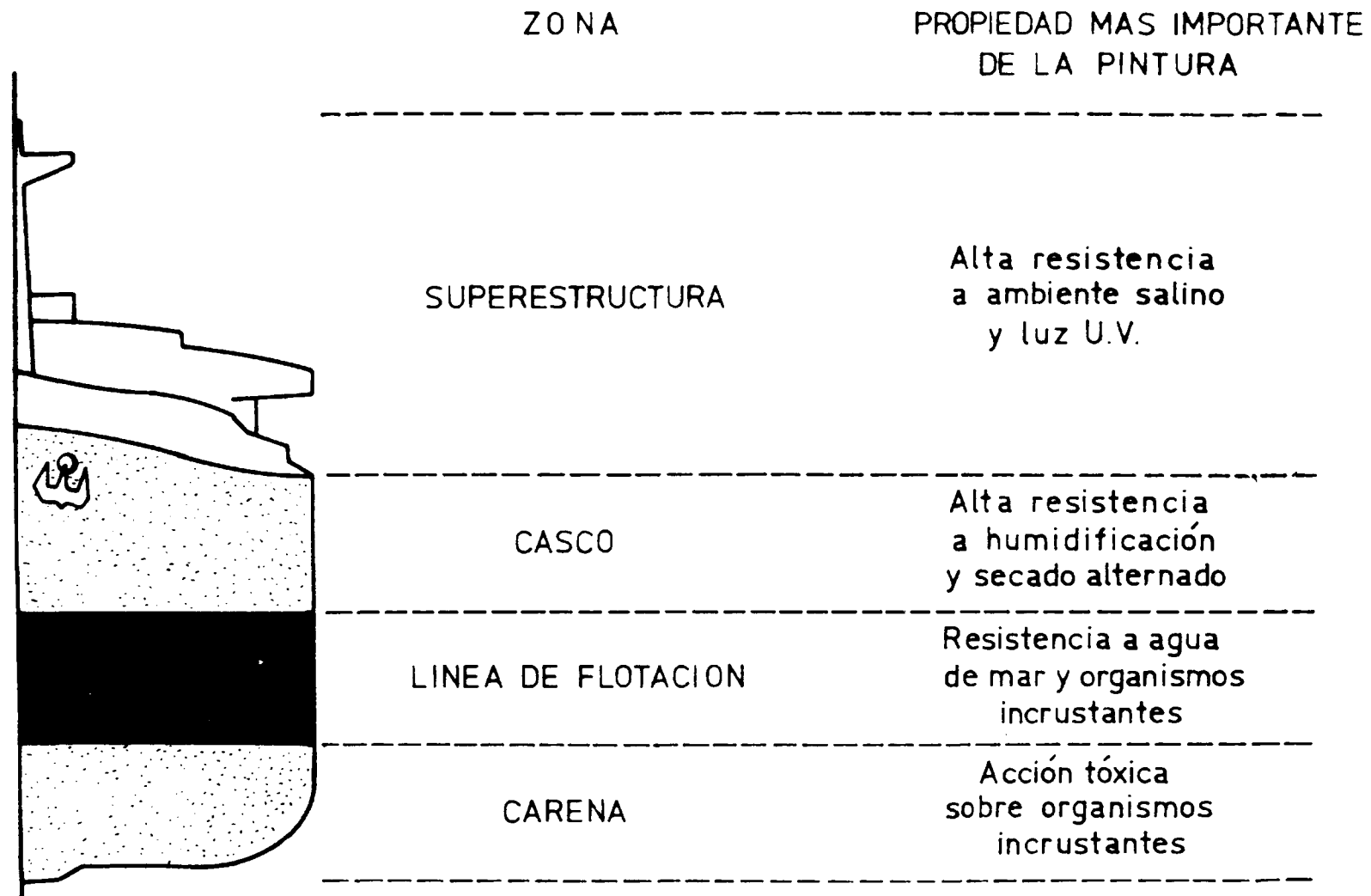


Figura 37. Características principales que deben reunir las pinturas aplicadas en diferentes zonas de obra muerta y obra viva de embarcaciones



tal condición. Pueden ser pigmentadas (esmaltes epoxídicos) o incluir un betún asfáltico o corte de alquitrán de hulla (pinturas epoxi-bituminosas o epoxi-coaltar). También en este caso se pueden desarrollar formulaciones sin solventes.

*Pinturas emulsionadas.* El vehículo es una emulsión del ligante en agua. Dicho ligante puede ser un aceite, un barniz, etc. Se diluyen con agua y al ser aplicadas en forma de película la emulsión se rompe, obteniéndose una fase oleosa continua que forma una cubierta de buena resistencia, la que no debe ser soluble en agua si la formulación es correcta. Se utilizan habitualmente en el pintado de mampostería o de madera, pero en la actualidad se está trabajando en investigación y desarrollo de pinturas anticorrosivas y antiincrustantes de este tipo. Al eliminar los disolventes se reduce la posibilidad de contaminación ambiental y de intoxicación para los operarios (pintores).

#### CLASIFICACION DE LAS PINTURAS DE ACUERDO AL BRILLO DE LA PELICULA

*Pinturas mate.* Son aquellas cuya película no posee brillo. Dentro de este grupo se encuentran los fondos anticorrosivos y las pinturas para paredes.

*Pinturas semi-mate.* La película posee poco brillo. Se emplean especialmente con fines decorativos (p.ej. pintado de puertas, carpintería de madera o metálica, etc.).

*Pinturas brillantes.* Son las que proporcionan una película de alto brillo y gran retención del mismo. Se emplean fundamentalmente en exteriores, por su resistencia a la acción de la intemperie.

#### CLASIFICACION DE LAS PINTURAS DE ACUERDO AL TIPO DE SECADO

*Pinturas que secan por evaporación de los disolventes y diluyentes.* Secan rápidamente, sin sufrir ningún cambio químico durante dicho proceso y proporcionan una película dura y resistente, que es soluble en el disolvente de la pintura o en otro de características similares (p.ej. la película de pinturas vinílicas es soluble en cetonas, la de caucho clorado en aromáticos, la de una pintura bituminosa en alifáticos, la de un barniz al alcohol en etanol, la de una laca nitrocelulósica en "thinner", etc.).

*Pinturas que secan al aire.* El secado es más lento que en el caso anterior y se produce con intervención del oxígeno del aire, que actúa sobre algunos componentes del ligante (aceites secantes). La película no se redissuelve en el disolvente de la pintura pero puede ablandar o ampollar en contacto con el mismo.

*Pinturas que secan por reacción química.* Esto puede ocurrir en frío, por combinación de dos componentes (como en el caso de las pinturas epoxídicas y poliuretánicas), o en caliente, por tratamiento en horno a la temperatura especificada por el fabricante (caso de pinturas para automóviles). Se caracterizan por su elevada resistencia y la película no se deteriora por la acción de los disolventes empleados en la elaboración de la pintura.

#### CLASIFICACION DE LAS PINTURAS DE ACUERDO CON EL ESPESOR DE PELICULA QUE PROPORCIONAN

*Pinturas convencionales (no tixotrópicas).* Son las que se suministran con una viscosidad adecuada para ser aplicadas por cualquiera de los procedimientos habituales (pincel o rodillo), proporcionando una película seca de 20-25 micrones de espesor. Aplicadas a soplete, previa dilución, el espesor final puede ser menor (15 micrones).

*Pinturas tixotrópicas.* Son las que se emplean en sistemas de alto espesor. Por las características que les imparten ciertos componentes pueden proporcionar espesores por mano del orden de 100-125 micrones, sin que se produzcan chorreaduras o corrimientos cuando son aplicadas sobre superficies verticales. Requieren un equipo especial para su aplicación (soplete sin aire comprimido o Airless).

#### ESQUEMAS DE PINTADO

Se denomina así el conjunto de capas de diferentes pinturas (figura 38) cuyo objetivo fundamental es proteger una superficie de la acción de un medio agresivo.

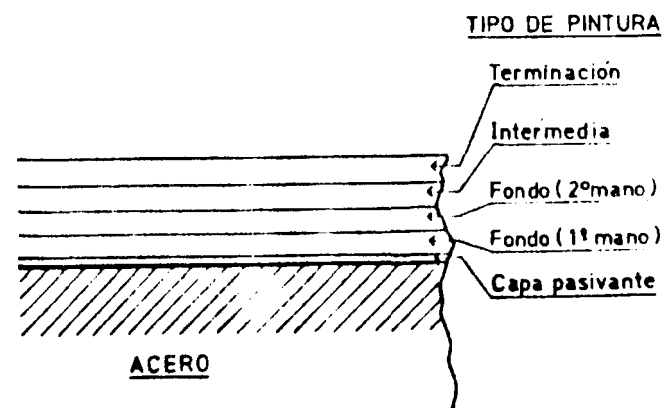


Figura 38.- Esquema de pintado

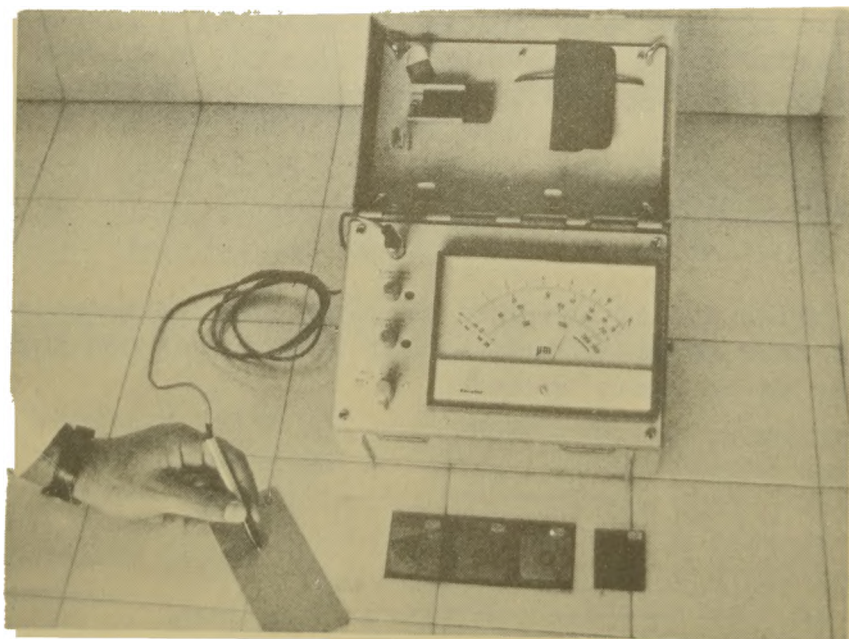
El esquema más simple está constituido por un fondo anticorrosivo (una o dos capas), directamente en contacto con el metal, y una pintura de terminación (también una o dos capas), destinada a evitar el deterioro de la pintura de base.

Esquemas más complejos pueden incluir un "shop-primer", si se ha empleado este producto durante la construcción de la estructura y no se lo ha eliminado posteriormente o un "wash-primer" si se ha granallado o arenado la superficie metálica y se ha aplicado luego este tipo de pretratamiento.

Una condición importante que debe cumplirse es que todas las capas del esquema mencionado correspondan a pinturas elaboradas con el mismo tipo de ligante (al aceite, alquídico, fenólico, caucho clorado, vinílico) para asegurar buena adhesión entre las diferentes capas.

#### ESPESOR DE UN ESQUEMA DE PINTADO

Debe determinarse con la máxima precisión posible, para lo cual se emplean métodos no destructivos. En obra se utilizan medidores magnéticos y en laboratorio aparatos electromagnéticos (figura 38), de mayor precisión.



*Figura 38.- Aparato electromagnético para medida de espesores de película seca; puede verse el palpador aplicado sobre una probeta pintada*

Una protección adecuada implica no sólo seleccionar las pinturas más convenientes, sino también determinar el espesor del esquema a aplicar.

Dicho espesor debe ser creciente, de acuerdo con las condiciones de agresividad del medio, como se indica a continuación:

Atmósfera no contaminada.....	40 - 50 micrones
Atmósfera medianamente contaminada.....	75 - 100 micrones
Atmósfera altamente contaminada (industrial y marina).....	100 - 150 micrones
Inmersión continua en agua de mar.....	250 - 350 micrones
Contacto permanente con líquidos agresivos.....	350 - 500 micrones

Al aumentar el espesor total se incrementa el efecto de barrera del esquema de pintado, al margen de las propiedades inhibitorias que en particular puedan aportar el pretratamiento (wash-primer) o el fondo anticorrosivo.

Los espesores que se mencionan en la tabla anterior se refieren todos a película seca, es decir después de la eliminación de los disolventes y diluyentes, como consecuencia del proceso de secado de la pintura.

#### CONDICIONES GENERALES QUE DEBE CUMPLIR UNA PINTURA O UN ESQUEMA DE PINTURAS

Dentro de los requisitos más importantes deben citarse los siguientes:

*Tolerancia a defectos de preparación de la superficie, sin que se produzca pérdida de adhesión (las pinturas vinílicas tienen, en este sentido, exigencias mayores que cualquier otro tipo).*

*Posibilidad de ser aplicadas en condiciones de humedad y temperaturas no ideales.* Normalmente se aconseja pintar con temperaturas no inferiores a 10-15°C y humedad del 65-70 por ciento. Sin embargo, en las pinturas para casco y especialmente en invierno, puede ser imprescindible pintar sin que se cumplan tales condiciones.

*Las pinturas deberán ser de rápido secado, a fin de que no adhiera polvo o impurezas sobre la superficie.*

*Deberán ser elaboradas con disolventes no tóxicos o emplear productos de mínima toxicidad.*

*Deberán tener un alto contenido de sólidos, a fin de proporcionar un elevado espesor de película seca.*

*Serán de larga vida útil y en algunos casos deberán soportar la acción de condiciones climáticas muy diferentes (caso de las pinturas para superestructura).*

*Será posible reparar zonas dañadas con facilidad y la nueva capa aplicada deberá adherir adecuadamente sobre las anteriores.*

#### DETALLE DE LAS CONSIDERACIONES TECNICAS A TENER EN CUENTA PARA LA ELECCION DE UN REVESTIMIENTO PROTECTOR A BASE DE PINTURAS

*Elección adecuada del shop-primer. Debe proteger durante el proceso constructivo y ser compatible luego con el revestimiento a utilizar.*

*Elección correcta de las pinturas. Debe hacerse en función del tipo de superficie, preparación de la misma y condiciones de agresividad del medio.*

*Elección del método de preparación de la superficie más adecuado, según se trate de acero, aluminio, chapa galvanizada, madera, etc. Influye también en esta elección el grado de ataque que se observa.*

*Elección del esquema a aplicar, en función de las condiciones de servicio.*

*Elección del espesor, de acuerdo con las características de agresividad del medio.*

*Elección del procedimiento de aplicación (pincel, rodillo, soplete con aire comprimido, soplete sin aire comprimido, inmersión) de acuerdo con el tipo y tamaño de la superficie u objeto a pintar y al tipo de pintura a usar.*

*Realizar un adecuado control de todas las operaciones enumeradas precedentemente.*

#### DETALLE DE LAS CONSIDERACIONES ECONOMICAS A TENER EN CUENTA PARA LA ELECCION DE UN REVESTIMIENTO PROTECTOR

*Costo de la pintura, aunque en general incide poco en el costo total del trabajo (la pintura representa, en general, alrededor del 15-20 por ciento del costo total).*

*Costo de los procedimientos de limpieza y preparación de superficies.*

*Costo de las reparaciones que pueda ser necesario efectuar (p.ej. cambio de chapas en el casco de un buque o de partes en una estructura) como consecuencia de los daños por corrosión debi-*

dos a incorrecta protección.

*Costo de la mano de obra de aplicación de la pintura.*

*Costo del alquiler de dique, cuando se trata del pintado de la parte sumergida del casco.*

*Lucro cesante correspondiente a la inmovilización de la embarcación, cuando se trata de navíos mercantes o problemas operativos en el caso del pintado o repintado de barcos de guerra.*



## PINTURAS ANTICORROSIVAS

El pintado de un barco tiene como objetivo fundamental *protegerlo contra la acción agresiva del medio marino*. Esta acción agresiva, cuando la embarcación está construida en acero, se traduce en la aparición de óxido (herrumbre), primero bajo la forma de zonas atacadas de relativamente poca superficie, pasando luego a un deterioro pronunciado que en algunas partes (por ejemplo la zona sumergida del casco) puede conducir a una perforación de las chapas, lo que obliga a su reposición.

En consecuencia la premisa fundamental es *elegir para este objeto las pinturas de mejores características*, que aseguren una prolongada durabilidad en servicio.

Para lograr dicho objetivo es necesario conocer algunos aspectos del *mecanismo* por el cual las pinturas protegen contra la corrosión.

Debe admitirse como un hecho indiscutible que *la corrosión marina es un proceso constante y continuo* y que todas las estructuras ubicadas en zonas próximas al mar o sumergidas en el mismo *se atacan*. Sin pinturas protectoras, en un lapso relativamente breve se desintegrarían por corrosión y deberían ser reparadas a fondo o reemplazadas.

La acción del agua de mar (electrolito) o del aire saturado de humedad, en presencia de abundante oxígeno, constituye una condición tan exigente que sólo puede ser superada eligiendo los mejores revestimientos anticorrosivos, con el objeto de espaciar las tareas de mantenimiento. El empleo de productos inferiores en calidad o de poca resistencia, obligará a un repintado mucho más frecuente.

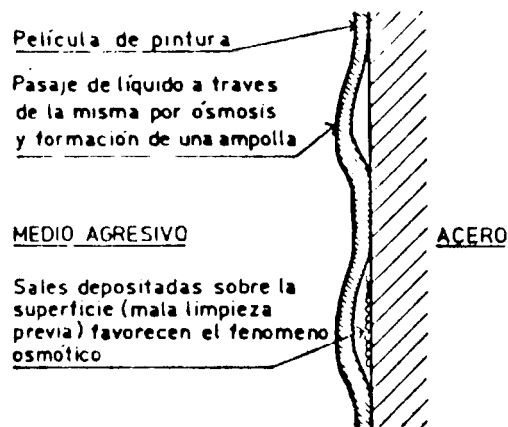
La función de esta pintura es la de proteger, en forma de una *película* con espesor variable entre 150 y 350 micrones (según la zona de la embarcación que se considere), *interponiéndose entre el material de base y el medio agresivo*.

Para que pueda cumplir con eficiencia esa función será *continua y uniforme*, no deberá cuartearse ni agrietarse como consecuencia de los movimientos de la estructura que la soporta, se adaptará a las deformaciones que la misma sufre y presentará un mínimo de ataque por la acción del medio ambiente (aire, agua de mar, etc.).

Las *condiciones fundamentales para que dicho revestimiento anticorrosivo sea eficiente* son las siguientes:



a) Tendrá buena resistencia al agua y baja absorción pues en servicio se encontrará muchas veces en contacto permanente con la misma y en esas condiciones no deberá manifestar ablandamiento, hinchamiento, ampollado o pérdida de adhesividad. Este fenómeno tiene relación con la cantidad de agua que penetra en la película y que queda retenida en el interior de la misma. Está vinculado con el tipo de resina empleado para la preparación del ligante y es muy diferente en un esmalte sintético, en una pintura de caucho clorado o en un poliuretano. Frente al agua una película de pintura se



comporta como una membrana semi-permeable dando lugar a un fenómeno osmótico, con pasaje de agua a través de la misma, de una solución más diluida a otra más concentrada. En el caso particular de la carena de un buque la solución más diluida es el agua de mar y la más concentrada es la que se forma en contacto con el metal cuando sobre el mismo ha quedado un depósito de sales no eliminado en las operaciones previas al pintado, condición esta muy frecuente en clima marino.

Fig. 39.- Comportamiento de una película de pintura frente al agua

b) Poseerá adecuada dureza, de tal manera que el deterioro de la cubierta orgánica por rozamientos o choques sea mínima.

c) Tendrá muy buena adhesión no sólo al sustrato metálico sino también entre manos, lo que está relacionado con la correcta formulación del ligante y una adecuada selección de componentes.

#### FORMAS COMO UNA PINTURA ANTICORROSIVA PROTEGE EL ACERO

Dos son los mecanismos principales para lograr este objetivo y que predomine uno sobre otro dependerá de la naturaleza o composición química de la pintura y del esquema de pintado elegido.

El primer mecanismo se basa en el concepto de impermeabilidad involucrando esto la resistencia al pasaje de agua, iones, oxígeno, etc. Esto significa una cubierta muy inerte, tanto inicialmente como después de un prolongado contacto con el medio agresivo. Con este tipo de mecanismo los fenómenos osmóticos no existirían o estarían reducidos a un mínimo. En la práctica es imposible lograr totalmente este objetivo y lo que puede pretenderse es aumentar el espesor de la cubierta protectora (mayor número de manos o empleo de pinturas que forman capas gruesas). Esto será complementado con la elección

adecuada de las pinturas (caucho clorado, epoxídicas, poliuretánicas).

El segundo mecanismo establece que *la película tiene un cierto grado de permeabilidad, cualquiera sea su espesor*, por lo que el proceso debe controlarse, no sólo con una adecuada formulación del ligante, sino utilizando *pigmentos anticorrosivos*, es decir sustancias que de alguna manera intervienen reduciendo la actividad del electrolito.

Las reacciones que pueden tener lugar están relacionadas con el tipo de pigmento empleado, y los casos más importantes son los siguientes:

a) *Uso de cromatos*. Son pigmentos tales como el cromato básico de cinc (solubilidad en agua 1,1 g/litro), el cromato de estroncio (0,6 g/litro) o el tetroxicromato de cinc (0,02 g/litro). La solubilidad indicada, aunque es muy baja, resulta suficiente para suministrar la cantidad de cromato en solución (iones cromato) necesarios para que se produzca una reacción química con el metal. Dicha solubilización se produce por acción del agua que penetra en la película y la sustancia que se utiliza como ligante, así como también la relación pigmento ligante, juegan un rol importante para que la cantidad de agua que accede al contacto con el metal sea mínima. Los cromatos oxidan el metal a una forma altamente estable y crean una condición pasiva en el sustrato.

b) *Empleo de pigmentos básicos de plomo*. Son sustancias tales como el minio (óxido salino de plomo), el sulfato básico de plomo, el silicato básico de plomo, etc. Puede haber una muy pequeña cantidad de anión plumbato en el agua absorbida y éste actuaría como pasivante del metal. Otra interpretación posible es que se genere una cierta alcalinidad y que como consecuencia de esto se inhiba la reacción de corrosión.

c) *Utilización de algunos pigmentos metálicos*, como el cinc en polvo. Las pinturas, denominadas "zinc-rich" primers, tienen muy alta concentración de cinc en la película seca (92-94 por ciento) lo que permite que se forme con el hierro una pila en la cual el electrodo deteriorable (ánodo) es el cinc, quedando el hierro protegido (cátodo). Debe haber contacto entre partículas en la capa del "primer" y se produce así una *protección catódica por medio de una pintura*. La resistencia total depende de las características del medio agresivo. En atmósferas no contaminadas o ligeramente contaminadas el cinc reacciona con el dióxido de carbono y con el oxígeno del aire, formando respectivamente carbonato de cinc y óxido de cinc, sustancias muy estables que colmatan los poros de la película y contribuyen a que la misma produzca un efecto de barrera adicional. En ambientes marinos o en zonas industriales, se forman respectivamente cloruro de cinc o sulfato de cinc, ambos muy solubles, y la película se deteriora rápidamente.

Como consecuencia de lo expresado anteriormente se concluye que un buen esquema de pintado, resistente a agentes agresivos, debe tener simultáneamente *la máxima impermeabilidad posible*, aunque ésta no sea total y *propiedades inhibidoras*.

Teniendo en cuenta las dificultades prácticas para formular un producto de características tan universales, la impermeabilidad de un esquema de pintado para uso marino está proporcionada fundamentalmente por la pintura intermedia y en algunos casos por la pintura de terminación (superestructura, casco, línea de flotación), mientras que las propiedades inhibidoras están a cargo del fondo antióxido propiamente dicho.

Una pintura anticorrosiva, para ser efectiva, *debe ser aplicada directamente sobre la superficie metálica*, salvo el caso ya mencionado del uso de wash-primers. Cuando incorrectamente se aplica sobre una superficie ya pintada, no hay efecto inhibidor posible y sólo puede contribuir al efecto de barrera del sistema.

## PINTURAS ANTIINCRUSTANTES

Constituyen la capa de terminación de la *parte sumergida del casco*. Eventualmente puede requerirse esta propiedad en las pinturas para línea de flotación.

Las pinturas antiincrustantes tienen por objeto prevenir la fijación y posterior crecimiento de los organismos incrustantes o "fouling". Son especies vegetales y animales que se adhieren sobre todas las superficies sumergidas si las mismas no están adecuadamente protegidas. En el caso particular del casco de las embarcaciones, incrementan la fricción y el consumo de combustible, provocan una reducción en la velocidad de desplazamiento y obligan a costosos carenados periódicos de mantenimiento.

### TOXICOS EMPLEADOS

Muchas de las pinturas antiincrustantes que se usan en la actualidad emplean compuestos de cobre (óxido cuproso), de mercurio (arseniato mercurioso, compuestos de fenil-mercurio), de arsénico (anhídrido arsenioso, arseniatos o compuestos orgánicos), de plomo y estaño (orgánicos). Para ser efectivos los tóxicos deben ser solubles en agua de mar, de manera de poder actuar frente al "fouling". Para que esa solubilización se produzca con el ritmo requerido, además de la solubilidad propia del compuesto *es importante que el ligante de la pintura se solubilice lentamente en el agua de mar*.

Lo que antecede indica que, en principio, una pintura antiincrustante manifiesta su actividad durante un lapso determinado (uno, dos o tres años, p. ej.). Ese lapso es en general menor que el de efectividad de los productos anticorrosivos más resistentes usados actualmente. Eso obliga a la reposición periódica de la película antiincrustante.

Dicha reposición no constituye un problema grave mientras se conserve la integridad del esquema de carena, es decir mientras no se produzcan en el mismo discontinuidades o roturas que permitan el ataque localizado de la superficie metálica, ya que las embarcaciones deben entrar periódicamente a dique para ser revisadas por múltiples motivos. Reponer sólo la pintura antiincrustante puede significar una estadía en dique de no más de 24 horas en los casos en que no hay daños mayores, pudiéndose aplicar en dicho lapso hasta dos manos de la nueva pintura, si se cuenta con personal

en número suficiente y medios adecuados.

Los tóxicos *deben ser de amplio espectro*, es decir que su acción debe ser efectiva sobre la mayor parte de las especies existentes en el medio considerado. Una determinada *acción específica* puede lograrse incorporando un *tóxico de refuerzo*.

## ACCION DE LOS TOXICOS

La acción de los tóxicos puede ser de *repelencia* hacia los organismos citados, se puede *producir la muerte de los mismos antes de su fijación definitiva* o pueden *actuar luego de la fijación*, alterando los procesos metabólicos y produciendo finalmente la muerte. A fin de que sea efectiva, la acción del tóxico debe quedar encuadrada dentro de los dos primeros mecanismos, ya que en el tercer caso, si bien el organismo muere, queda fijado en forma definitiva, con lo que se producirán los problemas de fricción mencionados con anterioridad.

En nuestro país, el tóxico más utilizado es el *óxido cuproso*, fácil de manipular y que no es tóxico para el hombre. Su acción se manifiesta sobre la mayor parte de las especies incrustantes. Tiene como inconveniente grave el de ser un compuesto químico muy inestable, por lo que su almacenamiento sin alteración previo a la elaboración de la pintura es muy difícil.

Cuando el tóxico se disuelve en agua de mar, se forma sobre la superficie pintada una capa laminar, de alta concentración. Si esa superficie no se mueve (caso de los barcos anclados en puerto) la lixiviación es menor. En navegación, debido a la acción turbulenta del agua de mar, se incrementa. En consecuencia, el tiempo total de navegación en el año es una variable que afecta la duración del sistema protector. Este aspecto debe ser tenido muy en cuenta por el fabricante en la formulación, regulando la solubilidad del vehículo, a fin de impedir un consumo exagerado cuando el barco está en movimiento.

Es importante precisar que la *fijación del "fouling"* se produce especialmente en los puertos; durante la navegación, y por encima de 6-7 nudos, los organismos, en general, no se fijan. Un barco en permanente navegación y con mínimas estadías en puerto, como es el caso de un petrolero, es menos susceptible al "fouling" que otra embarcación cuya estadía en puerto es prolongada.

El *espesor de película* de la pintura antiincrustante aplicada *tiene importancia en relación con el tiempo de efectividad*. Siendo el vehículo soluble en agua de mar, es evidente que dicho *espesor* (figura 40) se irá reduciendo a lo largo del proceso de *inmersión*, en el cual la película pierde tóxico y ligante.

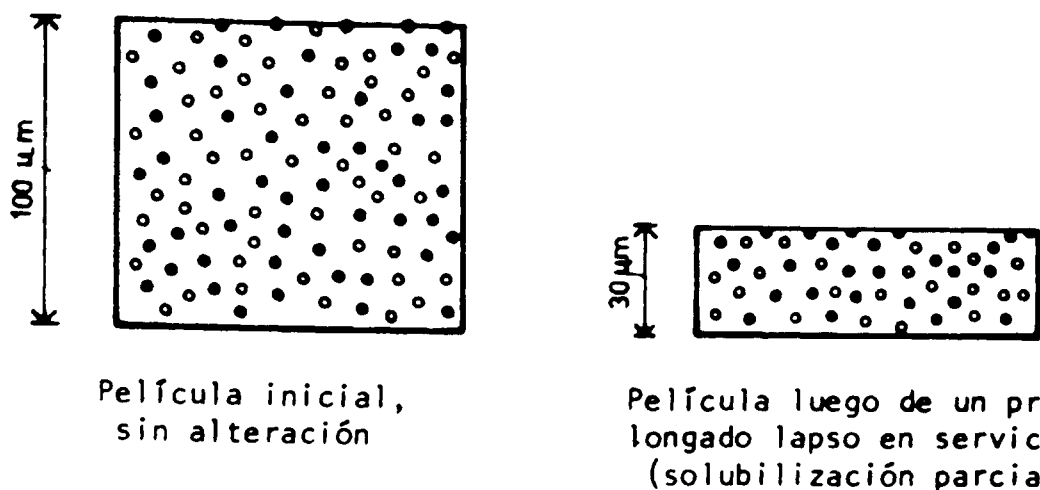


Fig. 40.- Disminución de espesor en servicio de una pintura anti-incrustante tipo vehículo soluble

La acción tóxica puede verse interferida si se forman compuestos insolubles entre la pintura y el agua de mar. Esos compuestos insolubles pueden deberse tanto a reacciones químicas de los pigmentos como del mismo ligante. Parte de esos productos se eliminan por erosión durante la navegación permitiendo que la película anti-incrustante esté permanentemente en condiciones de liberar tóxico.

#### APLICACION

Estas pinturas pueden ser pintadas con pincel, rodillo, soplete convencional o soplete sin aire comprimido (Airless). Este último procedimiento es el que permite aplicar mayor espesor por mano.

Las dos manos de pintura antiincrustante que habitualmente integran un sistema para carenas se aplican sobre el fondo anticorrosivo o sobre la pintura intermedia, si la misma ha sido empleada.

La pintura antiincrustante, por sus características particulares de formulación, debe ser pintada muy poco antes de que la embarcación sea puesta en servicio nuevamente, después del carenado. *Períodos de secado mayores de 3 a 5 días no son convenientes* por cuanto puede incrementarse su solubilidad en agua (oxidación de determinados componentes del vehículo) o producirse cuarteado (por tratarse de pinturas con alto contenido de resina y aptas para estar permanentemente en inmersión). En este aspecto *deben respetarse las indicaciones del fabricante.*

Es poco frecuente que en esta etapa, aun prolongando el tiempo de permanencia fuera del agua, se produzca desprendimiento de la película, pero esto sí puede ocurrir en los casos de entrada a dique de un buque para solucionar problemas de otra naturaleza (p).

ej. localizados en hélices o timón. Una pintura antiincrustante después de un tiempo en servicio, con su película parcialmente agotada, tiene menor adhesión sobre el fondo y puede llegar a desprenderse fácilmente, dejando el casco sin protección antiincrustante.

En caso de estadías breves en dique se recomienda rociar con agua permanentemente la superficie de la carena, para evitar que la misma se seque, usando un chorro de agua con poca presión, para no favorecer el desprendimiento de pintura. Si la estadía se prolonga, es preferible dejar secar el casco, eliminar con material abrasivo la pintura vieja, sin dañar el fondo y aplicar una nueva mano de pintura antiincrustante.

El *tiempo de secado* de estas pinturas es corto, pudiendo aplicarse hasta dos manos en un mismo día si las exigencias del carenado lo requieren y se pinta a soplete. A pincel o soplete es conveniente dejar transcurrir como mínimo 24 horas entre manos.

#### FACTORES QUE INFLUYEN SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS PINTURAS ANTIINCRUSTANTES

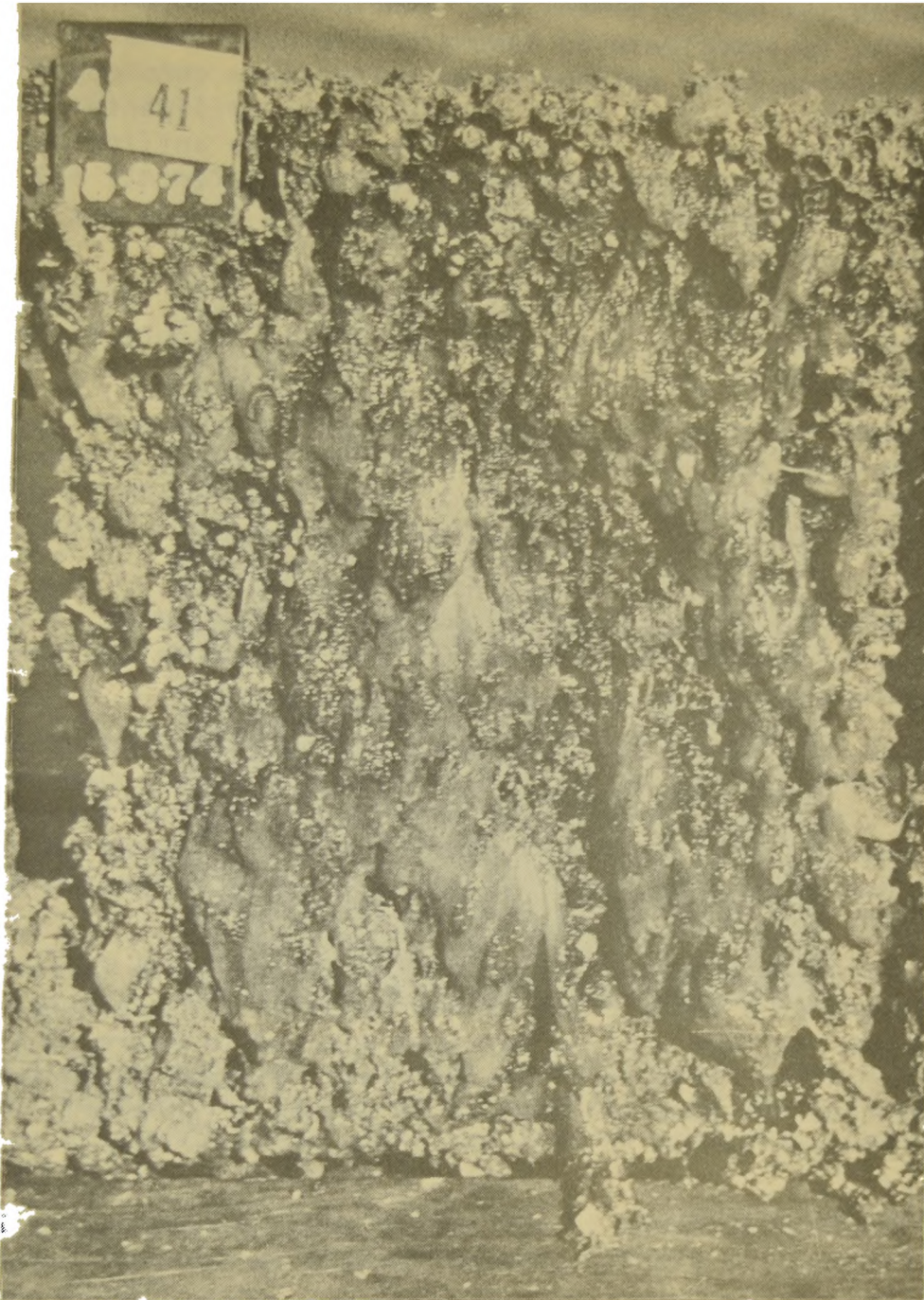
Existen factores relacionados con el medio y factores intrínsecos, correspondientes a las pinturas, que tienen relación con los resultados que se obtienen en la práctica.

Dentro de los primeros debe mencionarse la *composición del agua de mar*, factor importante que incide sobre la solubilidad de la película. El problema principal está relacionado con la *contaminación existente en los puertos*, ya que si los contaminantes son ácidos, como generalmente ocurre, esa acidez hace que el pH del agua de mar, que normalmente posee un valor 8,2, descienda a cifras inferiores a 7 y creando una condición en la cuál el ligante de la pintura no es soluble (este ligante es una resina ácida, la colofonia y necesita un medio ligeramente alcalino para disolverse). En consecuencia la película se bloquea, el tóxico no se disuelve y el "fouling" adhiere y se desarrolla, dando lugar a los problemas enunciados al principio de este capítulo. El aspecto que presenta una superficie en esas condiciones puede observarse en la figura 41.

La *temperatura del agua de mar*, si aumenta, incrementa la solubilidad tanto del tóxico como del ligante, por lo que la vida útil puede ser considerablemente más corta en un medio con temperatura más alta, como ocurre en las zonas tropicales.

Otros aspectos importantes relacionados con la actividad de las pinturas antiincrustantes, tales como la *concentración de cobre en el agua de mar* o el *contenido de oxígeno* no tienen prácticamente influencia sobre la acción de control de las pinturas antiincrustantes.





*Figura 41*

*Aspecto que presenta, luego de tres meses de inmersión, un panel pintado con un esquema para carena, sumergido en el puerto de Mar del Plata, cuando la pintura antiincrustante no ha tenido efecto tóxico sobre el "fouling"*



Resumiendo, lo importante es hacer resaltar que mientras que en la formulación de un fondo anticorrosivo se persigue como objetivo fundamental obtener el máximo poder protector con un ligante inerte frente al medio agresivo, en el caso de las pinturas antiincrustantes se tiene un producto reactivo, que *modifica permanentemente sus características cuando está sumergido en agua de mar*, a fin de que el tóxico pueda ser puesto en libertad.

Los *factores relacionados con la formulación* y con los *métodos de elaboración* también influyen sobre la bioactividad y sobre el resultado en servicio de estas pinturas.

Considerando lo relacionado con la formulación, debe destacarse la importancia que tiene el *contenido de óxido cuproso* y algunas *propiedades de este pigmento* (riqueza, distribución de tamaño de partículas), como así también el *tipo y contenido de pigmento inerte* (extendedor).

Considerando los *procesos de elaboración de la pintura*, tiene suma importancia la preparación del ligante y el tiempo de molienda del tóxico, dependiendo éste del tipo de equipo utilizado.

Finalmente, el *tiempo de estacionamiento de la pintura en el envase* también influye sobre la actividad de este material, por producirse en esta etapa reacciones químicas entre el pigmento (cuando este es óxido cuproso, básico) y el ligante (ácido), y además por la posibilidad de que el pigmento pase a otros estados de oxidación (cobre metálico u óxido cúprico).

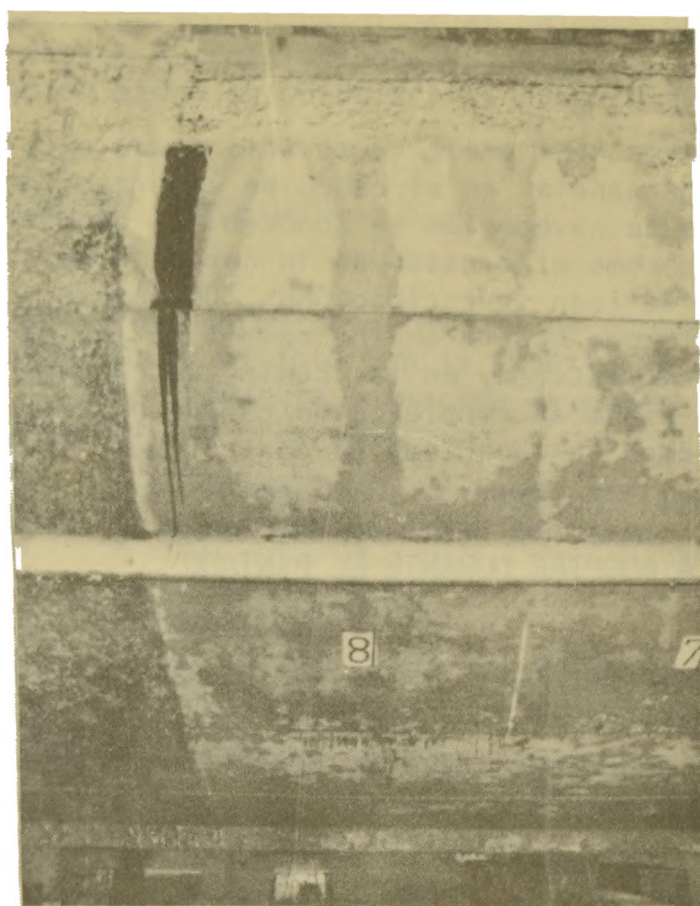
Dentro del Programa ECOMAR, patrocinado por el SENID (Servicio Naval de Investigación y Desarrollo) se han obtenido formulaciones antiincrustantes con una vida útil en servicio que oscila entre 12 y 36 meses. Con esas pinturas se pueden resolver los problemas de mantenimiento de la carena de las embarcaciones de la Armada (figura 42).

## OTROS TOXICOS UTILIZADOS

Como ya se mencionó al principio de este capítulo, *compuestos de mercurio y de arsénico*, inorgánicos y orgánicos, son también empleados, principalmente como tóxicos de refuerzo, por su acción específica sobre determinadas especies de "fouling". Sin embargo estos compuestos comienzan a ser objeto de prohibiciones en muchos países, por su toxicidad frente a organismos superiores.

Dentro de los *tóxicos más recientemente incorporados en la formulación de pinturas antiincrustantes*, se encuentran algunos biocidas (compuestos orgánicos de estaño y de plomo) que se caracterizan por ser *químicamente compatibles* (no reactivos) con los otros componentes lo que *facilita la elaboración*. Son incoloros, por lo que pueden prepararse pinturas de colores diversos (las pinturas a base de óxido cú-

proso son de color colorado), que además no son corrosivas en contacto con aluminio o acero, tienen baja solubilidad en agua y un amplio espectro en lo relativo al control de las especies incrustantes más importantes.



*Figura 42.- Estado de la carena (completamente libre de "fouling") de una embarcación de la Armada después de 24 meses en servicio; a la izquierda puede verse una zona no protegida, incrustada*

Los compuestos mencionados son el óxido de tributil-estaño o TBT<sub>2</sub>O, el fluoruro de tributil-estaño (TBT<sub>2</sub>F), el fluoruro de trifeníl-estaño (TPT<sub>2</sub>F), etc.

#### ENSAYO DE PINTURAS ANTIINCRUSTANTES

El análisis químico y los ensayos físicos de laboratorio, a diferencia de lo que ocurre con otros tipos de pintura, no son suficientes para establecer el posible grado de eficiencia en servicio de las pinturas antiincrustantes. A lo sumo permite conocer el contenido de óxido cuproso, el tipo de inerte utilizado y el contenido total de pigmento, proporciona alguna información sobre la composición del ligante, pero no puede saberse con exactitud si el tóxico.

podrá ser solubilizado en la proporción necesaria para evitar la incrustación del casco.

La *eficacia* o *rendimiento potencial* puede ser establecida en laboratorio midiendo la solubilización de tóxico en condiciones normalizadas, sumergiendo paneles en recipientes con agua de mar, en condiciones de agitación y temperatura controladas. A intervalos, por vía química, puede determinarse el contenido de cobre de la solución.

El *comportamiento real en servicio* sólo puede determinarse mediante el pintado de paneles en el casco de embarcaciones cuyos itinerarios y períodos de navegación se conocen. En general tanto este tipo de experiencia como el pintado de la carena completa sólo se justifican cuando se realizan investigaciones. Un ensayo de menor costo, que se aproxima a lo que ocurre en los cascos de los barcos, es el que utiliza *balsas experimentales*, en las cuales se colocan paneles de acero, pintados con esquemas completos de carena y se verifica al cabo de un cierto tiempo su capacidad de control del "fouling".

#### PRECAUCIONES A ADOPTAR DURANTE EL PINTADO

Siendo productos de cierta toxicidad es necesario adoptar precauciones durante el pintado.

A tal efecto pueden considerarse tres tipos de pinturas, cuya toxicidad es creciente de 1 a 3:

1. A base exclusivamente de compuestos de cobre (óxido cuproso).
2. Las que tienen además incorporados compuestos orgánicos o inorgánicos de mercurio en proporción inferior a 2 por ciento, compuestos de arsénico (inorgánico) y de estaño (orgánico).
3. Aquellas a las que se han incorporado compuestos de mercurio en proporción superior a 2 por ciento (tanto inorgánicos como orgánicos), órgano-arsenicales y órgano-plúmbicos.

En todos los casos es indispensable, *cuando se aplican a pincel o a rodillo*, que los operarios empleen mamelucos que les cubran el cuerpo, capuchas, guantes y protectores para los ojos.

Para la *aplicación a soplete*, además, se deberá utilizar filtro para la respiración (tipo filtro de polvo), el que será renovado como mínimo cada nueva jornada de trabajo. Para las pinturas del tipo 3 es conveniente que, como precaución complementaria, se impida el acceso a la zona de pintado de personas no protegidas.

Lo fundamental es proteger piel, labios y ojos, no tocándose estos últimos con los guantes sucios. No se deberá comer, beber o fumar (esto último por razones de inflamabilidad) en la zona de pintado.

Si la pintura se pone en contacto con la piel removerla con un

disolvente industrial y luego lavarse con agua y jabón.

Como guantes son convenientes aquellos que no se atacan por los disolventes de las pinturas (p.ej. PVC). Para prolongar su duración, antes de sacarlos es conveniente lavarlos con el disolvente, dejando luego evaporar el mismo.

#### OTRA PRECAUCION IMPORTANTE

Las pinturas antiincrustantes a base de compuestos de cobre no deben estar en contacto directo con la superficie metálica (hierro, aluminio, etc.) para evitar la formación de pares galvánicos y el proceso de corrosión que ello genera.

La continuidad de la película de fondo anticorrosivo y un espesor adecuado de la misma impide dicho contacto.



## PREPARACION DE SUPERFICIES

Previo a la aplicación del esquema de pintado, la superficie debe ser sometida a *limpieza*, para eliminar polvo y suciedad, aceites y grasas, óxidos diversos, pinturas viejas, etc., cuya presencia afectaría la adhesión, la durabilidad y en algunos casos la dureza de la cubierta orgánica protectora. Complementariamente puede aplicarse un *pretratamiento*, que implica utilizar productos que reaccionan químicamente con el acero, pasivándolo y haciéndolo así menos sensible a la corrosión.

### SELECCION DEL METODO ADECUADO

Actualmente, debido en gran parte a la falta de información técnica adecuada, no se suelen utilizar sistemas idóneos o se aplican criterios de economía erróneos para la selección de los mismos. Si bien esto permite disminuir los costos iniciales, esta economía se ve anulada a largo plazo por el incremento que se opera en los gastos de mantenimiento.

La elección del método adecuado depende del *estado inicial de la superficie del metal de base* y varía según se trate de acero para la construcción de barcos nuevos o de aquel sobre el que hay que realizar sólo tareas de mantenimiento después de un tiempo de servicio prolongado. Tiene también importancia el *tipo de impurezas presentes* y el *diseño y ubicación* de la pieza o estructura a tratar.

En el caso de las construcciones nuevas el acero tiene *impurezas de laminación (escama o calamina)* y si ha sido almacenado a la intemperie se habrán formado sobre su superficie óxidos diversos, sulfatos, cloruros, carbonatos, etc. En las *operaciones de mantenimiento*, el tratamiento a utilizar dependerá del grado de deterioro alcanzado por el esquema protector y de su adhesión al sustrato.

El polvo, junto con las grasas y aceites que lo mantienen adherido al sustrato se eliminan mediante el empleo de *disolventes* o de *detergentes* (métodos físicos), pudiéndose emplear también *alcalis* (método químico) tales como soda cáustica (hidróxido de sodio), sosa (carbonato de sodio), etc. Eventualmente puede utilizarse también el *chorro de agua a alta presión*.

La escama de laminación, los óxidos diversos (herrumbre) y los restos de pinturas viejas y deterioradas o quemadas en las zonas con cordones de soldadura se eliminan mediante la acción de la *llama oxiacetilénica* o de gas, *cepillado manual o mecánico*, *picareteado*, *granallado* o *arenado*. Los citados anteriormente son métodos físicos y como ejemplo de métodos químicos pueden mencionarse el *decapado á-*

cido (clorhídrico o sulfúrico), el empleo de mezclas decapantes y el fosfatizado.

## ELIMINACION DE ESCAMAS DE LAMINACION Y OXIDOS

La escama de laminación o calamina ("millscale") se forma durante el laminado del metal, tanto en frío como en caliente, por exposición del mismo al aire. En el caso del laminado a alta temperatura o laminado en caliente esa escama está compuesta por óxido ferroso, de fórmula  $\text{FeO}$ , directamente en contacto con el metal, óxido ferroso-férrico u óxido salino ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y finalmente óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Este último corresponde al estado de oxidación mayor del metal. La distribución porcentual de estas impurezas se indica en la figura 43.

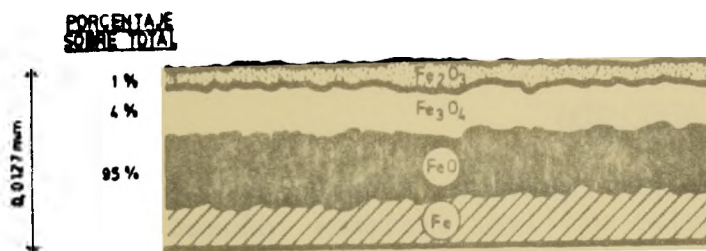


Figura 43.- Composición de la escama de laminación o calamina en el caso del acero laminado en caliente

temperatura o laminado en caliente esa escama está compuesta por óxido ferroso, de fórmula  $\text{FeO}$ , directamente en contacto con el metal, óxido ferroso-férrico u óxido salino ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) y finalmente óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Este último corresponde al estado de oxidación mayor del metal. La distribución

porcentual de estas impurezas se indica en la figura 43.

El óxido ferroso, que como ya se expresó es el que está directamente en contacto con el metal, tiene gran tendencia a la hidratación por acción de los agentes atmosféricos.

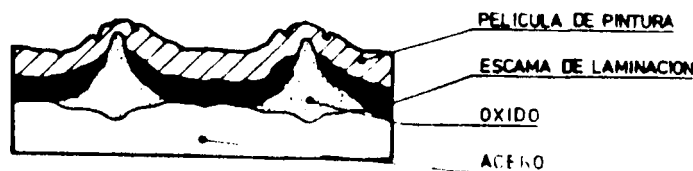
La permeabilidad de la escama de laminación (y la de la película de pintura, si se ha pintado sobre la misma) es suficiente como para permitir el acceso del agua y del oxígeno. Si la superficie tiene inicialmente el aspecto que se muestra en la parte superior de la figura 44, al producirse el pasaje de los agentes agresivos ocurre un cambio en el sistema cristalino de la capa próxima al metal y un gran aumento de volumen. El crecimiento del óxido férrico así formado produce el desprendimiento parcial de la capa de calamina. El metal de base queda al descubierto y en ambientes muy húmedos, zonas industriales o climas marinos se origina la pila hierro/agua/calamina, en la cual el cátodo (calamina) es de mucho mayor tamaño que la zona anódica (metal) por lo que esta se corroe rápidamente, teniendo lugar un proceso localizado o "pitting" (picado). La consecuencia es una acentuada disminución del espesor y pérdida de la resistencia mecánica.

En el caso del acero laminado en frío, aún cuando la distribución de los óxidos formados es diferente, el ataque también se produce.

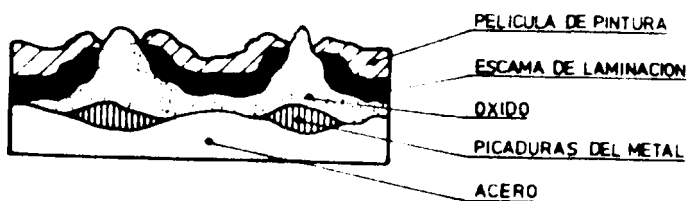
Todas las reacciones que ocurren sobre el acero expuesto a la intemperie sin protección suceden también, como se mencionó, debajo



PELICULA APLICADA SOBRE ESCAMA DE LAMINACION Y OXIDO



PASAJE DEL AGUA DEL MEDIO A TRAVES DE LA PELICULA, AUMENTO DE VOLUMEN DEL OXIDO Y CUARTEADO DE LA PELICULA.



EL PASAJE DE AGUA PROVOCA PRIMERO EL AGRIETADO Y LUEGO EL DESPRENDIMIENTO DE LA PELICULA, APARECE OXIDO EN LA SUPERFICIE Y PICADURAS EN EL METAL.

Figura 44.- Acción del agua sobre la herrumbre y la escama de laminación

de la película si la misma es aplicada sin eliminar la escama de laminación y los óxidos o sobre superficies con defectuosa preparación.

La acción destructora de los contaminantes perdura aún después de aislado el sustrato y la falla del sistema (que puede incluir su completo desprendimiento, como se muestra en la figura 45) se producirá en un lapso que es función de la naturaleza química del contaminante, de su concentración y adhesión, de las propiedades físicoquímicas de la pintura aplicada y del espesor total de película.

#### GRADO DE LIMPIEZA DE LA SUPERFICIE

Para este tipo de acero se pueden establecer cuatro estados de la superficie metálica, de acuerdo con lo que se indica en la escala sueca *Svensk Standard SIS 05 59 00*, que incluye patrones fotográficos de comparación:

- (A) Superficie completamente cubierta con la escama de laminación, de color azulado; dicha escama es prácticamente con-





Figura 45.- Desprendimiento del revestimiento protector aplicado sobre una superficie mal preparada

tinua, con poco o nada de herrumbre.

- (B) Superficie que ha comenzado a herrumbrarse (formación de óxido férrico hidratado), con parcial desprendimiento de la escama.
- (C) La escama ha oxidado total o parcialmente y se desprende por rasqueteado; poco picado de la superficie, pero observable a simple vista.
- (D) La escama se ha desprendido totalmente por oxidación y la chapa presenta un apreciable picado.

La norma citada da además cuatro *grados de limpieza*, denominados Sa 1, Sa 2, Sa 2,5 y Sa 3 y que corresponden a las siguientes características finales de la superficie tratada:

- (Sa 1) Limpieza liviana, con eliminación de escamas y óxidos (herrumbre) sueltos y también las impurezas diversas.
- (Sa 2) Limpieza cuidadosa, con eliminación de la mayor par-

te de las escamas, óxidos, etc.

(Sa 2,5) Limpieza muy cuidadosa, luego de la cual quedan sólo trazas de impurezas.

(Sa 3) Limpieza total del metal ("metal blanco"); remoción completa de las impurezas.

Una versión mejorada de dicha escala ha sido publicada en 1975 por la *Shipbuilding Research Association of Japan*, que incluye además fotografías correspondientes a deterioro del acero protegido por "shop-primers" y de preparación de superficies en zonas soldadas y quemadas de la estructura.

Sobre superficies pintadas con el esquema completo y previo a la limpieza se debe establecer la *oxidación visible* sobre la película o la existente debajo de ella sin manifestación exterior.

El primer caso está contemplado en la *escala de la British Iron and Steel Research Association (BISRA)*, que aparece en la figura 46, donde se normalizan grados de oxidación correspondientes a 0,1; 0,2; 0,5; 1 y 2 por ciento, considerándose que se debe repintar si se alcanzan los valores 0,1 a 0,5 por ciento.

La norma ASTM D-610-43 presenta también una serie de patrones fotográficos, lo mismo que la Escala Europea. Todos los casos citados se refieren a la observación de la superficie sin eliminación de la pintura existente.

La especificación del *Steel Structures Painting Council* de EE. UU. en cambio da una escala comparativa que exige la eliminación del esquema de pinturas previo a la observación. Dicha escala se refiere a superficies oxidadas entre 0 y 50 por ciento (fig. 47).

Como se puede apreciar las diferentes normas varían ampliamente y en la práctica pueden aparecer situaciones no contempladas dentro de las mismas.

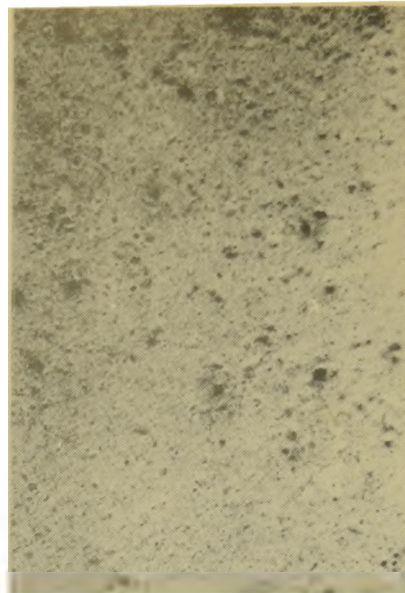
## LIMPIEZA CON VAPOR O AGUA CALIENTE A PRESION

La limpieza con vapor o con agua caliente a presión se emplea para remover el polvo atmosférico y musgo depositados sobre la superficie de pinturas expuestas durante mucho tiempo al exterior. Dichas impurezas son eliminadas por la acción combinada de una alta temperatura de trabajo (150°C) y presión.

Las estructuras donde la pintura envejecida por la acción de la intemperie presenta sólo tizado se pueden repintar económicamente si se emplea este método de limpieza, que prácticamente no deteriora la pintura en buen estado de conservación, debiéndose cuidar que la presión no sea excesiva y tampoco muy prolongado el tiempo de acción.



0,1 % de oxidación



0,2 % de oxidación



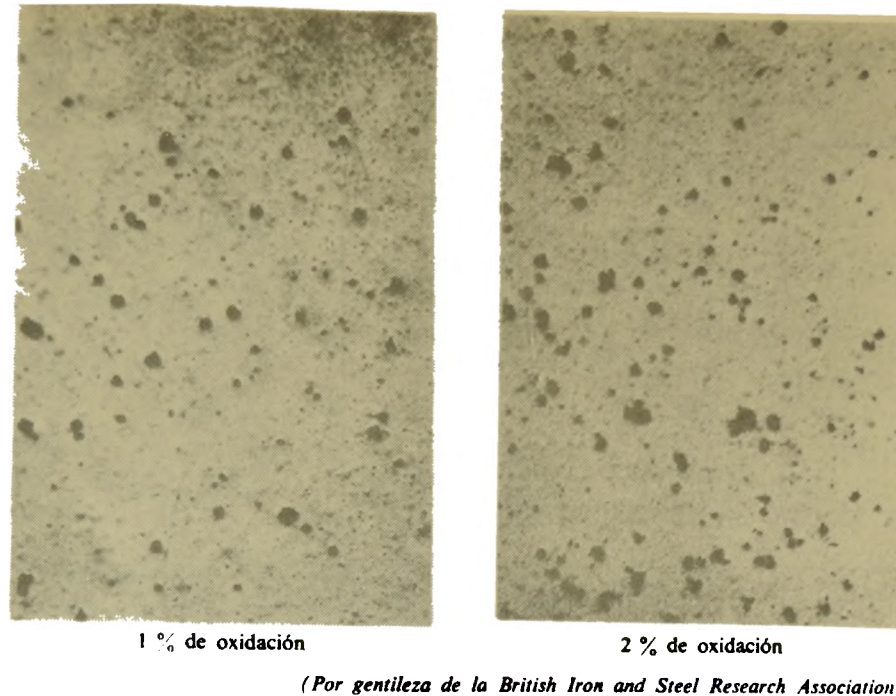
0,5 % de oxidación

## LIMPIEZA CON AGUA A PRESION

Es un método que remueve la pintura poco adherida (figura 48) o ampollada, el óxido suelto, aceites y grasas y polvo atmosférico. Es necesario aclarar que el agua a presión no produce una superficie de características equivalentes al arenado pero es un método mucho más eficiente que el empleo de herramientas manuales.

La limpieza con agua a presión es muy útil en el caso de superficies muy irregulares e inaccesibles en muchos lugares para las herramientas usuales.





(Por gentileza de la British Iron and Steel Research Association)

Figura 46.- Escala de grados de oxidación de la British Iron and Steel Research Association

#### TRATAMIENTO POR MEDIO DE ACIDOS MINERALES

Tres son los ácidos utilizados normalmente para la limpieza de superficies: sulfúrico, clorhídrico y fosfórico.

Los ácidos sulfúrico y clorhídrico *actúan tanto sobre la herrumbre como sobre la calamina* y su mecanismo de acción varía de acuerdo con la composición relativa de los óxidos presentes en la escama de laminación (laminado en frío o en caliente).

El ácido fosfórico *tiene acción decapante sólo sobre la herrumbre*, y la misma es acompañada por una *acción pasivante complementaria*.

Los óxidos con mayor contenido de oxígeno son insolubles en los ácidos mencionados, mientras que el óxido ferroso, en cambio, se disuelve rápidamente. En este último caso la porosidad de la calamina beneficia el proceso, ya que el ácido penetra a través de los poros, disolviendo el óxido ferroso y produciendo la deposición de los demás en el fondo de la cuba. La formación de estos lodos insolubles indica que el fenómeno puede ser considerado como un caso de desprendimiento de la escama.

El *ácido sulfúrico* es el agente decapante más utilizado. Se lo emplea en concentraciones que varían entre 5 y 25 por ciento en volumen, incrementándose la velocidad de ataque con la concentración.

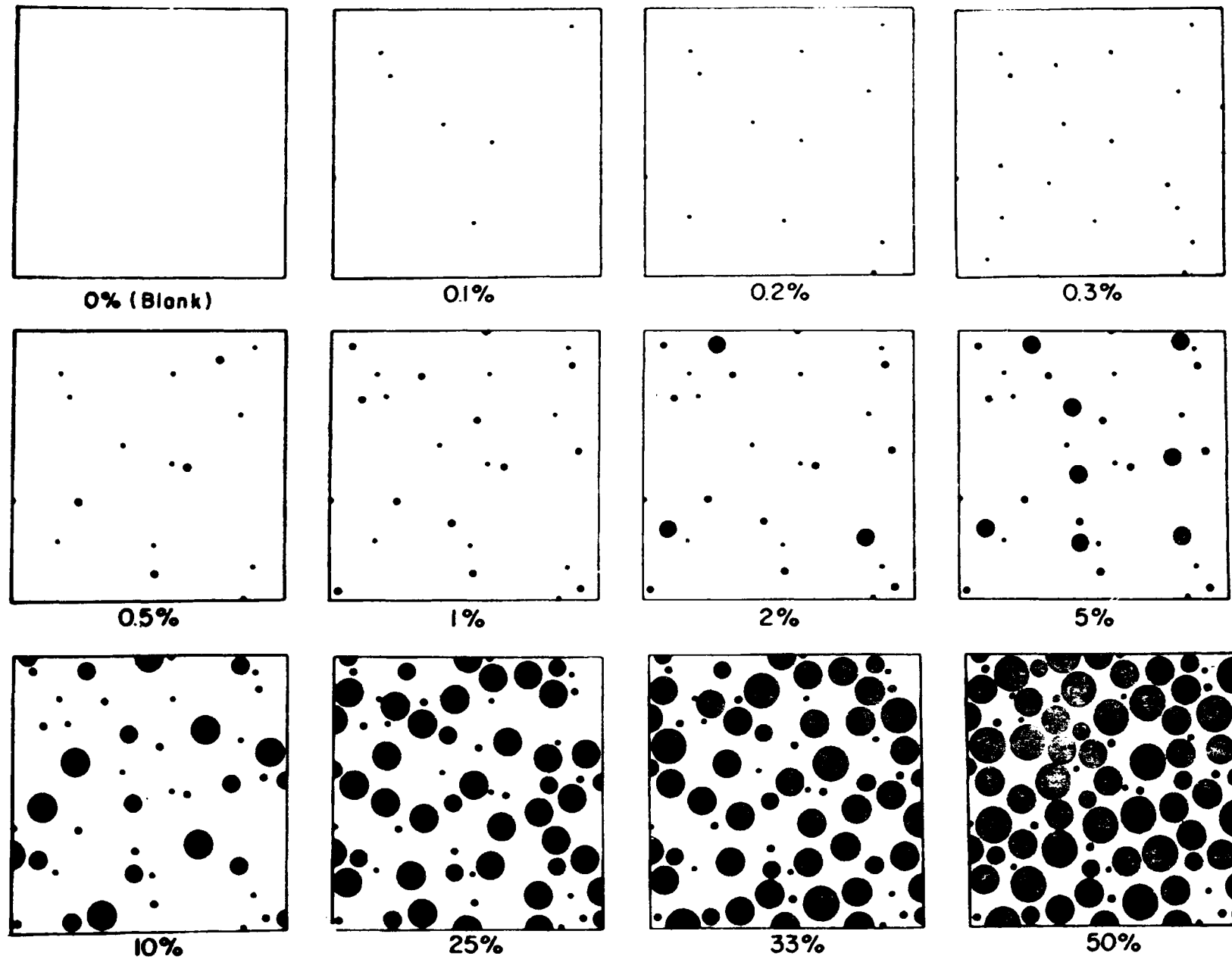


Figura 47.- Escala de grados de oxidación de superficies metálicas (Steel Structures Painting Council)

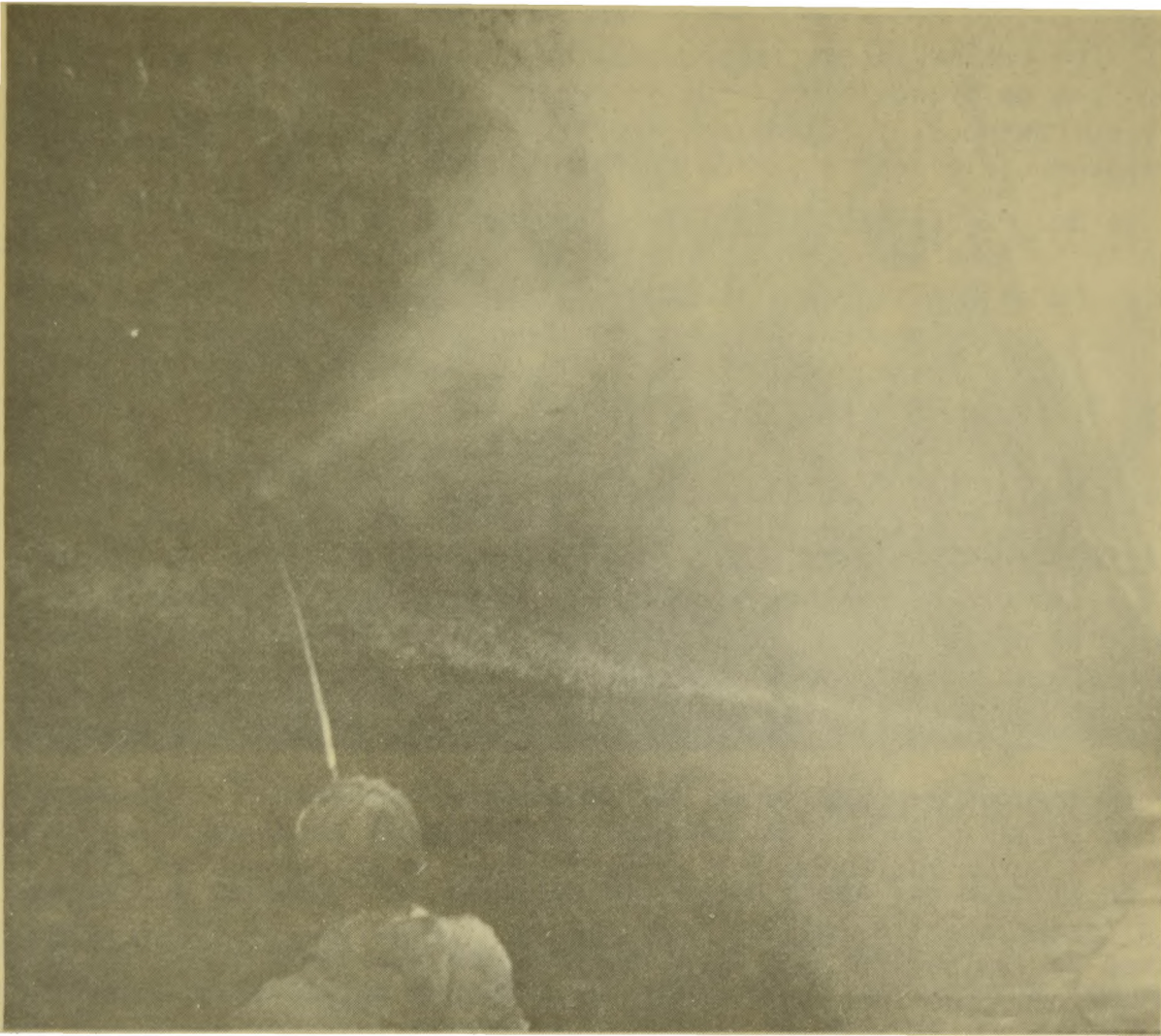


Figura 48.- Limpieza de una superficie con agua a presión

Por arriba del valor citado en último término disminuye la velocidad de reacción. La temperatura acelera el proceso y puede ser necesario el empleo de *inhibidores* para evitar el ataque del metal.

Durante el tiempo que dure el decapado debe mantenerse constante la concentración de ácido en el baño, verificando mediante determinaciones periódicas de densidad o por análisis químico el contenido de materia activa en la solución. Se debe reponer el ácido consumido.

El *ácido clorhídrico* se utiliza en los casos en que el sulfúrico demuestra poca efectividad, como cuando se trata de óxido formado en atmósferas altamente corrosivas, cuando han sufrido algún tipo de deshidratación, etc. El ácido clorhídrico reacciona formando jabones con todos los metales presentes y penetra rápidamente a través de los poros de la calamina. Esta propiedad hace que se lo pueda utilizar a temperatura ambiente o calentando como máximo a

40°C. Por encima de esa temperatura no es conveniente su utilización pues desprende cloruro de hidrógeno (ClH), altamente agresivo y corrosivo y que tiene una tendencia mayor a la del sulfúrico para producir picado o corrosión localizada.

El *ácido fosfórico* se utiliza como agente decapante en todas aquellas piezas que están moderadamente oxidadas y sin calamina presente. No deja residuos potencialmente peligrosos sobre el sustrato y en los huecos y poros queda depositada una capa de fosfatos complejos que no tienen influencia negativa sobre la película de pintura, debido a su gran estabilidad.

No debe confundirse el *uso del ácido fosfórico* en estas condiciones con el *fosfatizado*. Este último proceso se realiza con soluciones que contienen fosfatos ácidos de hierro, cinc o manganeso o una mezcla de ellos y que forman sobre el sustrato una capa fina, cristalina y continua. Esta capa, firmemente adherida, constituye una barrera protectora efectiva que impide la penetración de humedad hasta el momento de iniciar el pintado. Provee además a la imprimación de una base de excelente adhesión.

#### ACCION DE LA LLAMA

En el caso del acero nuevo con calamina, el flameado aprovecha la diferencia entre los coeficientes de dilatación del acero y la escama de laminación, generando tensiones entre ambas superficies, las que provocan luego el resquebrajamiento y desprendimiento de la capa superior. Al proceso contribuye la disminución de volumen (contracción) que se produce en los óxidos hidratados al perder agua por efecto de la temperatura.

El tipo, forma, tamaño y velocidad de pasaje de la llama depende de la geometría de la estructura a tratar. Sobre chapas de acero se utilizan quemadores que formen llamas planas, mientras que en los ángulos y zonas poco accesibles se emplean las redondas.

#### RASQUETEADO, CEPILLADO Y PICARETEADO

Son procedimientos que permiten salvar situaciones de emergencia, cuando no es posible realizar la limpieza por procedimientos más efectivos.

El *rasqueteado* se realiza en forma manual, mientras que el *cepillado* puede efectuarse manualmente o utilizando cepillos rotatorios. Son procedimientos que permiten separar el material suelto o mal adherido, pero no el óxido o la pintura firmemente unidos al sustrato metálico. Son relativamente efectivos en el tratamiento de



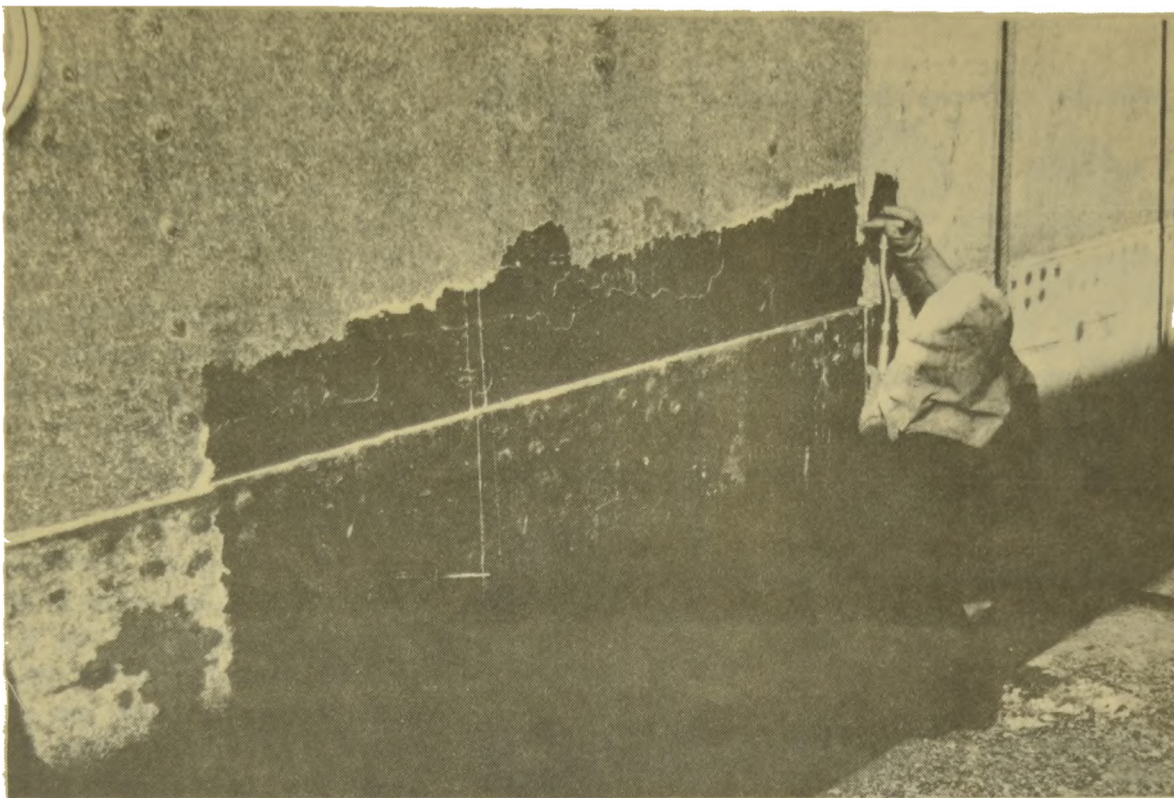


Figura 49.- Picareteado neumático del casco de una embarcación a nivel de línea de flotación: se elimina la pintura y parte de la herrumbre, pero queda óxido en los poros del metal

superficies pequeñas. No es aconsejable su empleo en el caso de materiales o estructuras que estarán sometidos a la acción de ambientes muy agresivos y es conveniente limitar su aplicación a zonas interiores. Una superficie limpiada por este procedimiento no supera el valor Sa 1 de la escala sueca ya mencionada anteriormente.

En el caso de grandes superficies puede emplearse el *picareteado manual* o *neumático*. En la figura 49 se observa la eliminación de la capa de pintura vieja en la zona de línea de flotación de una embarcación. Conjuntamente con la pintura se elimina la mayor parte del óxido pero no puede evitarse que parte del mismo quede en el interior de los poros del metal y en las irregularidades de la superficie. Una limpieza de este tipo corresponde al valor Sa 2 de la Escala Sueca.

#### ARENADO Y GRANALLADO

Estos métodos reciben la denominación de "*shot-blasting*", que hace referencia al impacto mediante el cual el material abrasivo limpia la superficie. Es el método más efectivo y proporciona un metal limpio y completamente libre de cualquier tipo de contaminantes, sobre el que puede aplicarse directamente el pretrata-



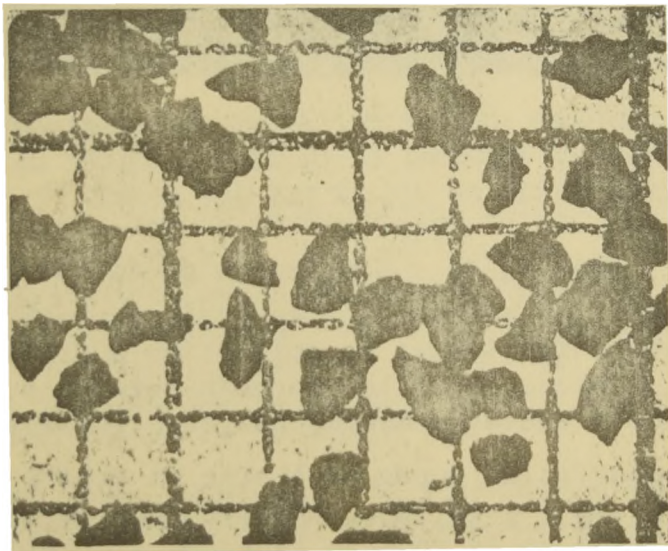
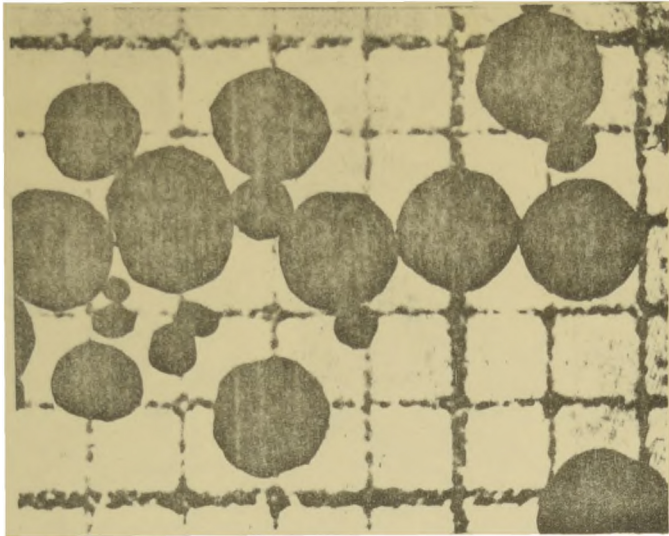


Figura 50.- Diferente forma de partícula de la granalla de acero

da o granallada dependerá del manejo adecuado de ese conjunto de variables. Lo importante es lograr una rugosidad adecuada (figura 51) que no impida la acción de "barrera" de la película de pintura. En ningún caso los "picos" deben llegar a la superficie de la película.

De todas maneras siempre es posible aumentar el espesor total del esquema de pintado, pero evidentemente, desde el punto de vista económico lo fundamental es eliminar los "picos" citados.

Paralelamente ocurre gran aumento de la superficie libre del me-

miento o el esquema de pintado. Deja además una superficie rugosa que mejora la adhesión y facilita el "anclaje" de la pintura.

Mediante estos procedimientos se puede llegar al valor 3 de la Escala Sueca, aunque muchas veces es admitido el valor 2,5.

El *arenado* puede ser *seco* o *húmedo*, mientras que el *granallado* se efectúa generalmente en seco y en equipos de circuito cerrado, a fin de permitir la recuperación de las granallas.

Los resultados que se obtienen dependen, en el caso del arenado, de las características de la arena (granulometría, contenido de sílice y forma de las partículas). (fig. 52). En el granallado un aspecto fundamental está relacionado con la forma de las granallas (fig. 50). La presión de trabajo influye de manera similar en ambos casos.

La *rugosidad* final de la superficie arena-

Figura 51

Diferente rugosidad de la superficie metálica como consecuencia del granallado o arenado

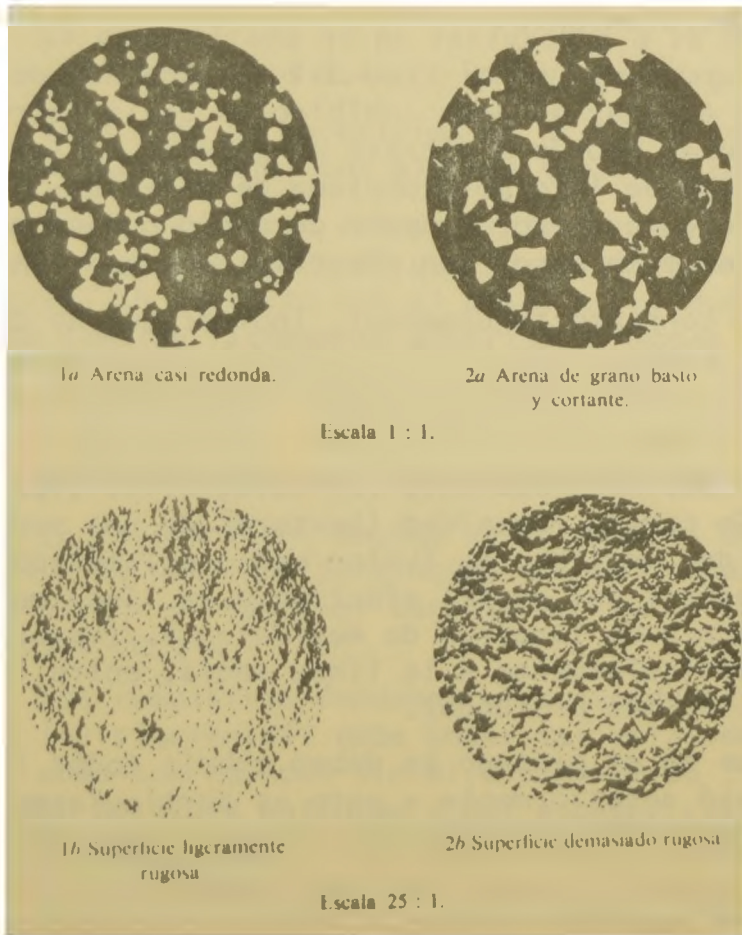
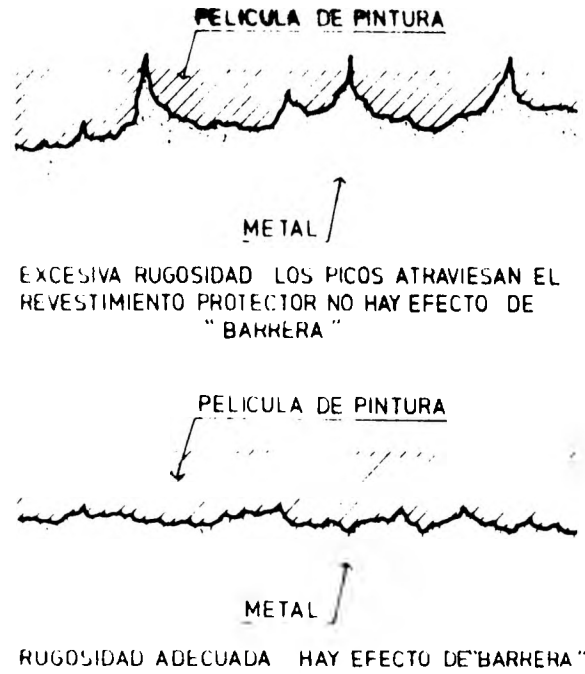


Figura 52

Fotomicrografías de arena de diferente tipo y características de las superficies obtenidas en cada caso



*Figura 53.- Limpieza con arena empleando un equipo de circuito cerrado*

tal, lo que trae aparejada la activación del mismo, volviéndose mucho más sensible a la oxidación. A fin de evitar esto se aplica inmediatamente un pretratamiento.

Una situación similar ocurre en el caso del arenado húmedo, por lo que es necesario agregar al agua inhibidores de la corrosión. Mezclas de fosfato de amonio y nitrato de potasio (relación 4/1) en la proporción de 1 kg por tonelada de material, o la incorporación de ácido crómico, cromato de sodio o dicromato de sodio (0,2 por ciento en peso) son efectivas con tal fin.

Es importante, como concepto fundamental, indicar que *no debe confundirse grado de limpieza (Norma SIS citada) con rugosidad de la superficie*. Se pueden obtener valores de SIS 2,5 ó 3, por ejemplo, con mayor o menor rugosidad.

El primer valor se determina mediante las fotografías tipo de la especificación. En cambio rugosidad (textura) de una superficie está determinada dos índices:  $R_a$  (valor medio aritmético de las distancias de los puntos del perfil efectivo a la línea media, dentro de una determinada longitud de medida); y  $R_t$  (mayor distancia, medida perpendicularmente a la línea media, entre la cresta más alta y el valle más profundo).

Lo importante es que en el pintado se deben cubrir todos los picos, como ya se expresó anteriormente y esto es particularmente importante en el caso de los "shop-primers" o pinturas de protec-



ción temporaria, que deben ejercer su acción con una sola mano de 25 micrones de espesor.

## PRETRATAMIENTO DE SUPERFICIES

Se refiere a la aplicación de productos tales como los "wash-primers" (*imprimaciones de lavado*), que se realiza inmediatamente después de la limpieza de la superficie (picareteado, arenado ó granallado).

Un esquema de pintado puede incluir o no un "wash-primer" pero es necesario dejar bien en claro que su utilización mejora notablemente el poder protector de cualquier tipo de pintura, siendo imprescindible su utilización en el caso de las pinturas vinílicas.

Un "wash-primer" está constuido por una base pigmentada (pigmento dispersado en una solución de resina) y un diluyente ácido (ácido fosfórico, agua e isopropanol) que se mezclan en el momento de su utilización, se aplican sobre el metal y reaccionan químicamente con éste. Se forma una fina capa de fosfatos complejos, el metal es oxidado a compuestos estables y pasivado, debiendo ser luego pintado.

La capa citada no es resistente a la oxidación si se la expone a la intemperie durante lapsos prolongados.

Este tipo de materiales se utilizan también para aluminio o chapa galvanizada, con algunas modificaciones de composición.

Una alternativa del pretratamiento es el *fosfatizado* de la chapa decapada, para el que se utilizan soluciones de ácido fosfórico. En contacto con el metal se produce una fina capa cristalina también firmemente adherida, y sobre la cual se pinta.

## SHOP-PRIMERS

En la práctica, muchas veces después del arenado o granallado se aplica una capa de pintura de poco espesor (25  $\mu$ m), destinada a proteger el material durante un cierto lapso, generalmente seis meses a un año.

Los requisitos fundamentales que debe cumplir un shop-primer son los siguientes: debe poder ser aplicado tanto con pistola normal como con equipos sin aire comprimido ("airless spray"), dando una película uniforme y del espesor citado; debe secar en 10-15 minutos, dando una película dura y resistente; no debe interferir en las etapas constructivas ni disminuir la eficacia de los procesos de soldadura o corte a soplete; no desprenderá en esas

condiciones humos o vapores tóxicos, irritantes o desagradables; debe ser compatible con los diferentes tipos de pintura a aplicar, dando una adecuada base protectora; si consta de dos componentes, deberá tener adecuada estabilidad luego de efectuado el mezclado, para permitir su aplicación en grandes superficies.

Todas estas condiciones implican una exigencia severísima, a tal punto que los productos que habitualmente se encuentran en el mercado no las cumplen en su totalidad.

Los diferentes tipos que se emplean habitualmente son los siguientes:

a) Pigmentados con óxido de hierro, con o sin pigmentos inhibidores; el ligante está constituido generalmente por resinas fenólicas, vinílicas, etc. Sus propiedades anticorrosivas son bajas.

b) Pigmentados con polvo de cinc ("zinc-rich" primers), de muy satisfactorio comportamiento al exterior y rápido secado. Su vehículo está constituido generalmente por resinas epoxídicas o caucho clorado, pudiendo formularse también con silicatos inorgánicos. El contenido de cinc en la película seca es alto (92 por ciento), actuando inicialmente como protección catódica; iniciado el ataque, en atmósferas no muy agresivas, pasa a actuar como barrera en una segunda etapa.

c) A base de aluminio. Dan una película cuya acción protectora es de carácter meramente físico, actuando como barrera. Son altamente reflectantes tanto a la luz solar como a la llama del soplete, lo cual resulta molesto para el operador. El vehículo de estos productos está constituido por resinas vinílicas, caucho clorado, etc.

## APLICACION DE PINTURAS

El término *aplicación* comprende todas aquellas operaciones que se realizan para llevar la pintura del *estado líquido* al *estado de película*.

Esta conversión implica un consumo de energía en forma de trabajo manual (pincel o rodillo), uso de aire comprimido (soplete convencional) o funcionamiento de una bomba neumática (pulverización sin aire o "airless spray"). Es por eso que tiene mucha importancia el comportamiento de las pinturas bajo condiciones de aplicación ya que esta operación depende de la consistencia del material, de su composición, de su velocidad de secado, etc. Estas características indican cual de los métodos se debe utilizar para obtener un adecuado acabado de la superficie a proteger.

La formulación de la mayor parte de los revestimientos protectores modernos es tal que permite su aplicación por medio de cualquiera de los procedimientos enumerados más arriba. Una excepción en la industria naval la constituyen las pinturas vinílicas, que deben ser aplicadas exclusivamente por sopleteado.

La naturaleza de la superficie a recubrir es otro de los factores a tener en cuenta ya que en función de ella se selecciona el método de preparación de superficies y el sistema de pintado a utilizar.

La elección de la forma de aplicación depende, por último, del tamaño de la superficie a recubrir, de su configuración geométrica y del sector del barco donde se van a realizar dichas operaciones.

La calidad del acabado de la superficie está determinada por los factores ya enumerados, dependiendo también del empleo de una mano de obra calificada, del buen uso de las herramientas auxiliares (andamios fijos o colgantes) y de una buena planificación del trabajo a realizar.

Un esquema de pintado consta de un número variable de capas de pintura, de diferente composición (como ya se ha indicado en el capítulo respectivo) y cada una de las cuales cumple una función especial.

El esquema de pintado mejora el aspecto de una superficie, proporciona la necesaria protección contra la corrosión y provee además un efecto decorativo. Estos propósitos no se pueden cum-

plir con una sola pintura y es por eso que cada esquema consta de varias capas de diferentes características.

El tiempo de secado debe ajustarse a las especificaciones existentes, de tal manera que el endurecimiento de la película se produzca dentro de un lapso adecuado. Antes de aplicar cada mano se cuidará de eliminar el polvo acumulado; además, en ambientes de alta humedad relativa, se recomienda pintar en horas adecuadas para evitar la presencia de agua sobre la superficie o que la misma se deposite poco después de aplicado el recubrimiento.

La uniformidad de aplicación es un factor importante en la obtención de resultados exitosos, fundamentalmente en el sentido de evitar discontinuidades en la película que luego, en servicio, provocan la aparición de defectos tales como cuarteado, agrietado, desprendimiento, etc. Este factor depende mucho del cuidado y habilidad del operario para manejar las herramientas involucradas. Si no se procede correctamente se producen *defectos de aplicación* que disminuyen la vida útil del esquema.

#### OPERACIONES PREVIAS AL PINTADO

Los pigmentos, que constituyen uno de los componentes importantes de una formulación, tienden a asentarse en el fondo del recipiente, especialmente cuando el producto se ha almacenado durante un tiempo excesivo.

Lo expuesto precedentemente no influye sobre la calidad de la pintura si se tiene la precaución de *homogeneizar* convenientemente el material previo a su uso. Ello se consigue por medio de una espátula y, para lograr que esa homogeneización sea efectiva, puede ser conveniente trasvasar a otro recipiente la mayor parte del líquido (vehículo), reincorporándolo lentamente a medida que se agita.

En el caso particular de las pinturas al látex no es admisible un cambio de características de la naturaleza apuntada, que puede estar relacionada con la rotura parcial o total de la emulsión.

La homogeneización manual es efectiva en recipientes de hasta 18 litros, y puede ser complementada por una agitación del envase. En el caso de recipientes mayores puede recurrirse a la agitación mecánica, empleando un equipo adecuado al tamaño del recipiente.

Algunos casos merecen ser puntualizados particularmente, como cuando se emplean pinturas con pigmentos metálicos (cinc, aluminio, cobre o bronce) y donde, por razones de estabilidad (pigmentos muy reactivos con el ligante), los mismos son incorporados inmediatamente antes del pintado. En este caso es conveniente empastarlos con parte del vehículo e incorporarlos luego a la masa total.

Las pinturas se entregan habitualmente con una *consistencia* que permite *directamente su aplicación a pincel*, sin dilución.

DEFECTOS DE PINTADO

Tipo	Causas	Método de aplicación
<i>Falta de nivelación Marcas de pincel</i>	Incorrecta formulación Uso de diluyentes muy volátiles Excesivo retoque al pintar	Pincel
<i>Falta de poder cubriente</i>	Incorrecta formulación Falta de homogeneidad Excesiva dilución Bajo espesor de película	Pincel Rodillo Soplete
<i>Corrimientos, cortinado, chorreado</i>	Exceso de espesor de la película Falta de uniformidad de aplicación Excesiva dilución	Pincel Rodillo Soplete
<i>Veteado</i>	Instrumental sucio Superficie sucia Aplicación poco uniforme Incorrecta homogeneización	Pincel Rodillo Soplete
<i>Pérdida de brillo (pinturas de terminación)</i>	Empleo de diluyentes inadecuados Película irregular Condensación de humedad atmosférica Defectuosa formulación	Pincel Rodillo Soplete
<i>"Piel de naranja"</i>	Viscosidad elevada de la pintura Uso de diluyentes muy volátiles Excesiva presión de sopleteado	Soplete



Si la consistencia es muy alta el producto *puede diluirse*, empleando para ello el diluyente aconsejado por el fabricante (generalmente aguarrás en los productos al aceite, mezclas de aguarrás-tolueno en los esmaltes sintéticos, tolueno en las pinturas de caucho clorado, mezclas de aromáticos y cetonas en las pinturas vinílicas). No debe exagerarse el agregado de diluyente pues ello conduce a la obtención de películas de menor espesor, pudiendo además producirse chorreaduras o corrimientos una vez aplicada la misma.

El uso de un diluyente que no corresponda al tipo de ligante con que está elaborada la pintura puede producir la gelificación del producto y en esas condiciones el mismo deberá ser descartado.

El ajuste de viscosidad, a nivel de laboratorio, planta o taller puede realizarse visualmente o por métodos sencillos, como los que emplean la copa IRAM (Norma 1109) o Ford (Norma ASTM-D-1200).

## APLICACION A PINCEL

La calidad de la mano de obra y las condiciones de trabajabilidad de la pintura tienen influencia decisiva sobre las características finales de la superficie pintada. Importa también emplear pinceles fabricados con fibras flexibles, siendo conveniente, en el caso de los *pinceles nuevos* mantenerlos sumergidos durante 48 horas como mínimo en aceite de linaza crudo. El aceite impregna las fibras y reduce la capacidad de absorción de las mismas para alguno de los componentes de las pinturas. Deben ser luego tratados con un disolvente adecuado para eliminar el exceso de aceite, pues este es incompatible con la mayoría de los vehículos de las pinturas industriales.

Los pinceles deben ser también adecuadamente limpiados al final de cada jornada de trabajo con la mezcla disolvente correspondiente al tipo de pintura empleada. Se deben dejar sumergidos en la misma hasta la mitad de la longitud de la cerda a fin de evitar que dicha mezcla actúe sobre el pegamento que las mantiene adheridas a la virola y al mango.

Un caso particular está dado por el empleo de pinturas emulsionadas o al agua. En este caso los pinceles se lavan con agua y, eventualmente un detergente, se enjuagan y secan.

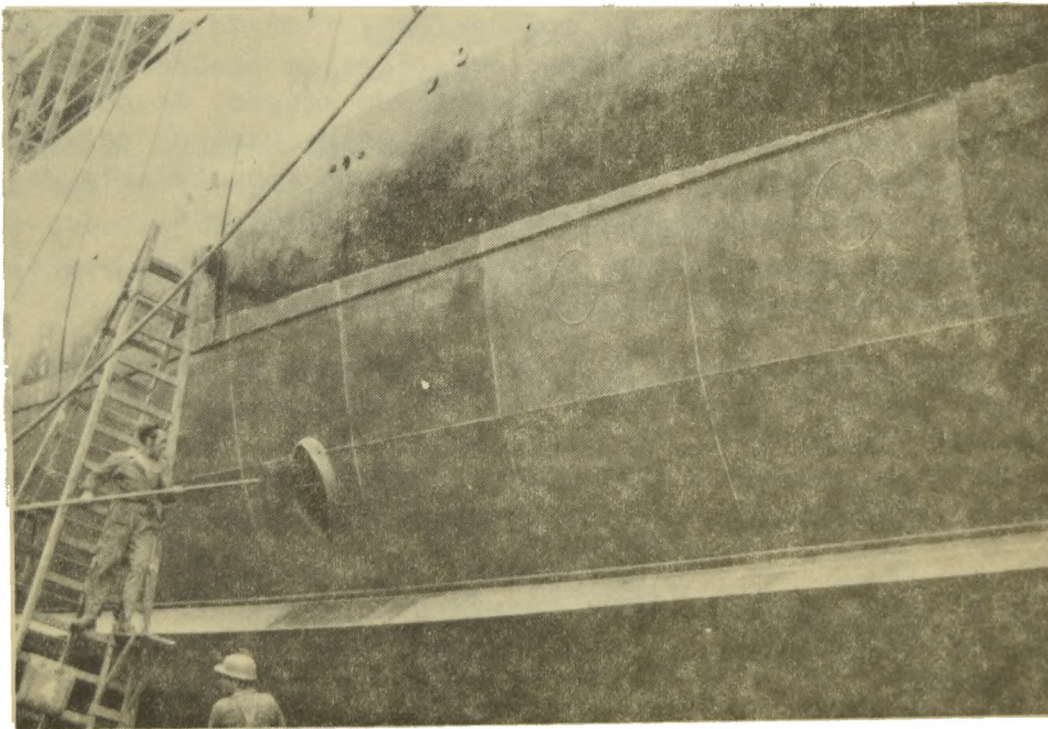
La mayor parte de las pinturas actuales nivelan por las características particulares de su formulación. Como además en general son de rápido secado, las superficies pintadas no pueden ni deben retocarse excesivamente. Se debe pintar rápido y aplicar una película uniforme. Las cubiertas brillantes marcan más los defectos de aplicación que las mate, y esto también debe ser tenido en cuenta por el aplicador.

## PINTADO A RODILLO

En la aplicación de las pinturas a rodillo, estos elementos pueden estar confeccionados en lana o espuma de poliuretano, que se fabrican de diferentes tamaños. Los más pequeños se montan sostenidos por uno de sus extremos, lo que permite su uso en rincones y lugares poco accesibles.

Para cargar el rodillo se emplean bandejas de hojalata con escurridores incorporados, con un ángulo de inclinación de 30-35 grados. Se sumerge la herramienta en el recipiente y mediante pasajes sobre los escurridores se logra una distribución uniforme del material. Esto asegura la aplicación de una película continua y de espesor adecuado.

Durante la aplicación (figura 54) el rodillo debe ser sostenido con firmeza y se lo deberá mover en todas direcciones para lograr el objetivo indicado en el párrafo anterior.



*Fig. 55.- Aplicación de una pintura a rodillo*

Es conveniente, en caso de imprimaciones o pinturas anticorrosivas de primera mano que se aplican sobre superficies viejas, con muchas irregularidades, pintar la primera mano a pincel y las restantes a rodillo. En el caso de las superficies nuevas o lisas, la primera mano puede aplicarse también a rodillo. Esta diferencia está justificada por los huecos y poros que existen en una superficie

que ha estado muchos años en servicio, especialmente en medio marino. El caso típico es el casco de un buque.

El acabado que se obtiene pintando a rodillo es muy bueno en el caso de las pinturas mate o semi-mate (p. ej. los fondos antióxido y las pinturas para paredes) y una apariencia final superior a la que se logra a pincel. Con las pinturas brillantes (casco, línea de flotación, etc.) la película aplicada a rodillo puede presentar irregularidades, graneado u otras fallas similares, que afectan el brillo final y el aspecto general de la superficie pintada.

La limpieza de los rodillos se debe efectuar con los mismos cuidados enunciados en el caso de los pinceles. Si se deja secar la pintura el rodillo no podrá ser utilizado nuevamente.

## APLICACION SOBRE GRANDES SUPERFICIES

Para el pintado de grandes superficies, como es el caso del casco de las embarcaciones en el dique de carena, es recomendable, a fin de acelerar la tarea, la *aplicación a soplete*. Este método asegura películas con buenas características de acabado y espesor uniforme, aún utilizando pinturas de rápido secado. Es aconsejable arbitrar los medios para *controlar dichos espesores de película*, pues los mismos pueden ser insuficientes como consecuencia del método de aplicación elegido y de la dilución efectuada.

La posibilidad de aplicar pinturas de imprimación por este procedimiento está limitada por el tipo de superficie.

En *superficies nuevas y absorbentes* (madera, aglomerados, cemento, etc.) resulta conveniente realizar la aplicación a pincel, pues de esta manera se facilita el llenado de los poros y la eliminación del aire ocluido en los mismos, que puede reducir la adhesión de la película. El resto del esquema puede aplicarse a soplete.

En el caso de *superficies nuevas y no absorbentes* puede emplearse el sopleteado desde la primera mano, con la consiguiente economía de tiempo.

### 1. PULVERIZADO A BAJA PRESION (SOPLATE AEROGRAFICO)

En el *sistema de pulverización a baja presión* se emplea para el sopleteado una pintura que utiliza aire comprimido tanto para atomizar la pistola como para depositarla sobre el objeto a pintar. El producto llega a la superficie en forma de gotas muy pequeñas, las que luego se unen entre sí formando una película continua. Se debe ajustar la viscosidad mediante el empleo de disolventes o di-

luyentes adecuados, de modo que la pintura tenga buenas características de fluencia.

Hay tres métodos para alimentar la pistola con la pintura a aplicar. En el *sistema por gravedad* (figura 55 a), el recipiente de alimentación está colocado en la parte superior y cae por gravedad dentro del lugar por donde circula el aire a alta velocidad.

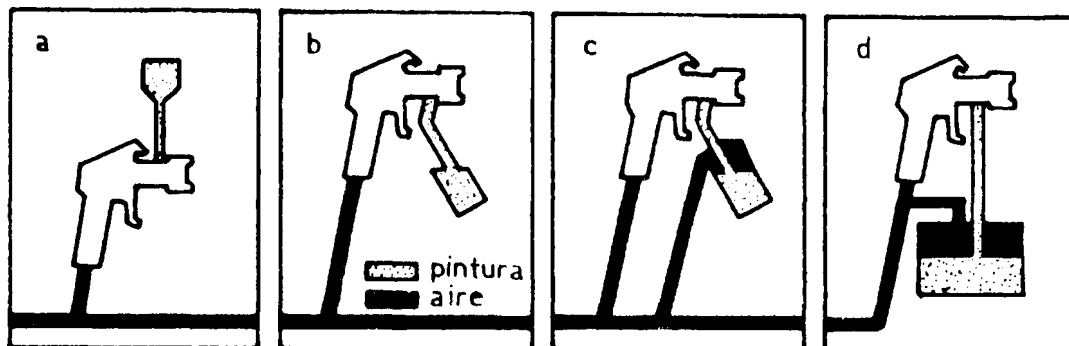


Figura 55.- Sistema de alimentación: a) por gravedad; b) por succión; c y d por presión

En el *sistema por succión* (caso b) el recipiente se encuentra en la parte inferior y el producto es arrastrado por vacío hasta el cabezal de atomización. En la *alimentación por presión* (c y d) la pintura es forzada a pasar desde un recipiente que está colocado en la parte inferior o a cierta distancia de la pistola pulverizadora.

Cualquiera sea el sistema de aplicación elegido, la pintura

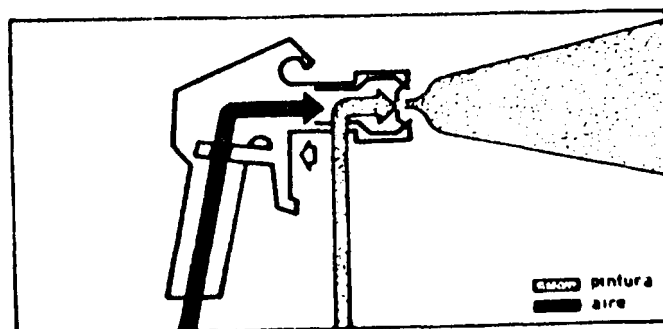


Fig. 56.- Principio de funcionamiento de la pulverización convencional: pintura con sistema de mezclado externo

llega a una boquilla de pulverización donde se puede producir mezclado externo o interno. Dicha boquilla se selecciona de acuerdo al tipo de pintura a aplicar.

En el caso del *mezclado externo* (figura 56) el aire comprimido atomiza el producto fuera de la boquilla. En el *mezclado interno* la mezcla se produce dentro de ella. En todos los casos una buena atomización requiere el balance adecuado de aire (presión y volumen) y cantidad de pintura.

La principal ventaja del método es la gran uniformidad del acabado y el hecho de que permite lograr espesores de película uniformes.

## 2. PULVERIZACION A ALTA PRESION ("Airless Spray")

Cuando se desea obtener espesores de película elevados, se recurre a la *pulverización a alta presión*, también llamada *pulverización sin aire comprimido* o "airless spray". En este sistema (figuras 57 y 58) se alimenta la pistola con pintura mediante una

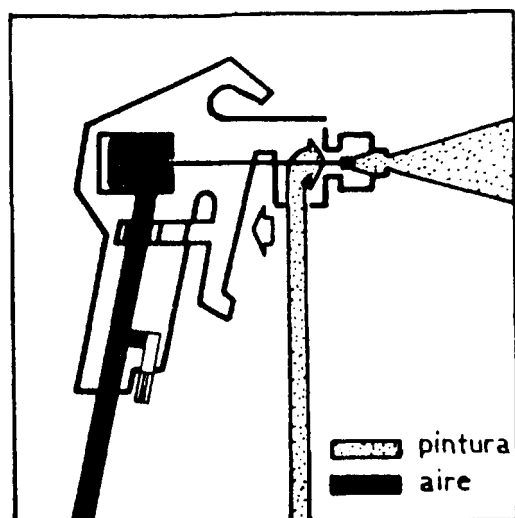


Figura 57.- Principio de funcionamiento del sistema sin aire comprimido

bomba neumática, llegando a una presión lo suficientemente alta como para que se produzca la atomización. Como el aire no se incorpora a la pintura ni es proyectado por ella, el atomizado se produce al pasar el producto a alta velocidad por una boquilla especial. Esta regula además la cantidad de pintura y el ancho del abanico. Para variar ambos parámetros es necesario cambiar de boquilla.

Con este sistema se pintan los denominados esquema de alto espesor o "high-build systems", que incluyen pinturas de alta viscosidad aparente (tixotrópicas). Se logran así espesores por mano su-

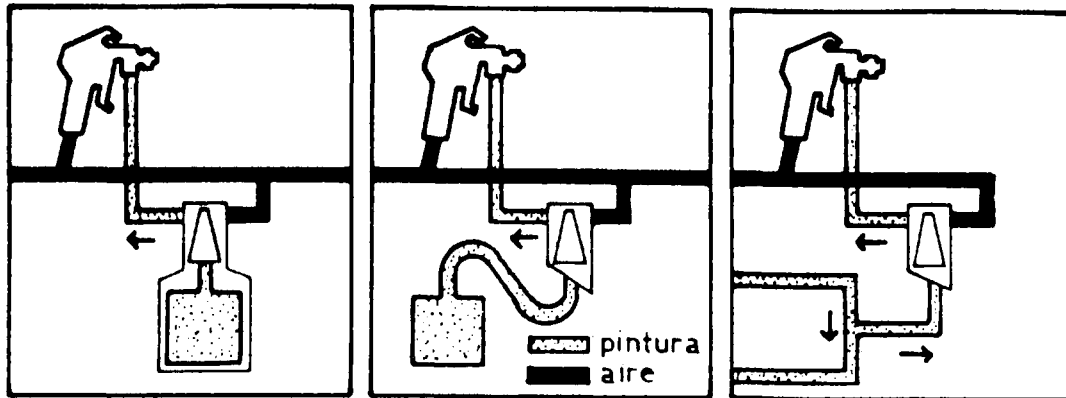


Figura 58.- Diferentes formas de alimentación del producto a la pistola en el sistema sin aire comprimido

periores por mano pues la pintura puede aplicarse sin dilución. No se produce cortinado por sus características particulares de composición.

El método sin aire comprimido puede emplearse también con pinturas convencionales. El espesor que se obtiene es mayor que en la pulverización con aire comprimido, pero de ninguna manera puede alcanzarse el espesor que se logra con pinturas tixotrópicas.

Los valores que se mencionan a continuación ejemplifican lo ya mencionado:

Aplicación a pincel..... Espesores hasta 25 micrones

Aplicación a soplete con aire comprimido, pinturas convencionales..... 10 a 20 micrones por mano

Aplicación a soplete sin aire comprimido, pinturas de alta viscosidad..... 80 a 100 micrones por mano

En todos los casos se hace referencia a espesores de película seca.

La ventaja fundamental de este método es que, con un esquema de tres manos, puede llegarse a espesores del orden de 350 micrones, que son los que se aconsejan, por ejemplo, para la protección de la parte sumergida del casco. Aplicando una pintura vinílica convencional a soplete con aire comprimido, se requerirían 10-12 manos para llegar al mismo espesor. La economía de mano de obra es obvia.

Si bien la instalación del equipo requiere un alto costo inicial, se estima que el mismo se amortiza en un lapso breve.

### 3. PINTADO ELECTROSTATICO

Para pintar por este método puede usarse pintura líquida o en polvo. Al salir de la pistola pulverizadora, las partículas de pintura se cargan a un potencial comprendido entre 20 y 60 kV, en el caso de los polvos y entre 60 y 160 kV para la pintura líquida.

El campo energético que se forma entre cuerpos a diferentes potenciales eléctricos atrae las partículas hacia el material que se va a recubrir y que se encuentra conectado a tierra. Una de las principales ventajas del método (que se nota sobre todo en la proyección de polvo) es que la pintura también se distribuye sobre la superficie posterior, en el caso de perfiles, enrejados, barras, etc.

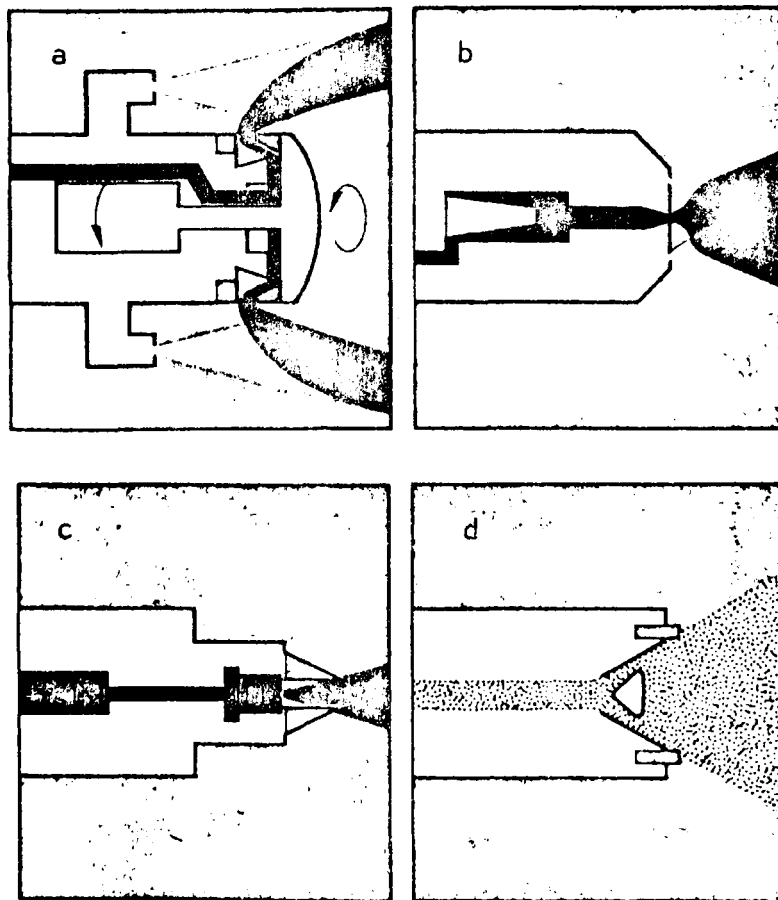


Figura 59.- Pintado electrostático: (a) atomizado mecánico en el borde de un disco accionado por aire comprimido; (b) combinación con proyección normal; (c) combinación con proyección a alta presión; (d) proyección electrostática de polvo

La proyección electrostática proporciona la máxima economía de pintura, en relación con los restantes sistemas a soplete. Las pérdidas pueden llegar a reducirse hasta 1-5 % en el caso de pol-

vos y 10-40 % en el caso de la pintura líquida.

En la figura 59 se describe una pistola para proyección electrostática "pura" (a) atomizada mecánicamente. Este tipo de pintado puede combinarse además con la proyección aerográfica convencional (b) y con el sistema "airless" (c). El caso (d) muestra la pulverización de pintura en polvo, con secado posterior por horneado.

### CUIDADOS EN LA APLICACION A SOPLETE

La eficiencia de la operación de pintado, cualquiera sea la técnica de pulverización empleada, depende fundamentalmente de que se adopten o no ciertas precauciones fundamentales:

a) *Distancia correcta entre el objeto a pintar y la boquilla de la pistola.* Si está muy cerca se aplica una capa demasiado gruesa y tiende a producirse un "cortinado" o "chorreadura" de la pintura (figura 60, a); si está muy alejada, se pierde disolvente, la pintura llega "seca" a la superficie y no adhiere o da una terminación tipo polvo arenoso. La distancia correcta varía entre 15 y 20

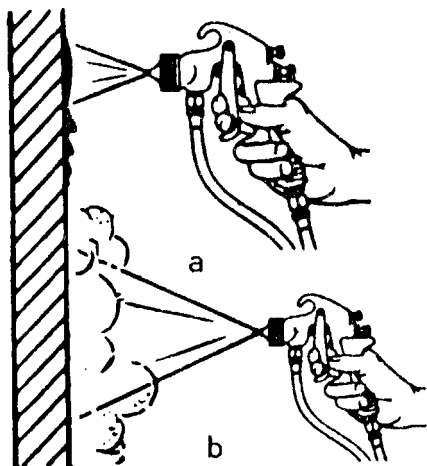
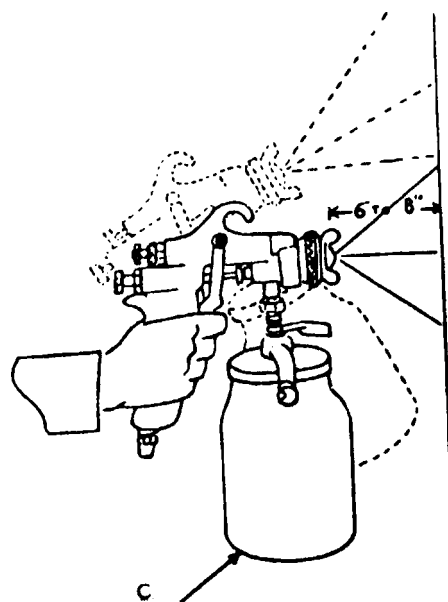


Figura 60.- Pistola demasiado cerca del objeto a pintar (a); pistola demasiado alejada (b)

Figura 61.- La pistola debe desplazarse en posición completamente vertical (c); es incorrecto inclinarla





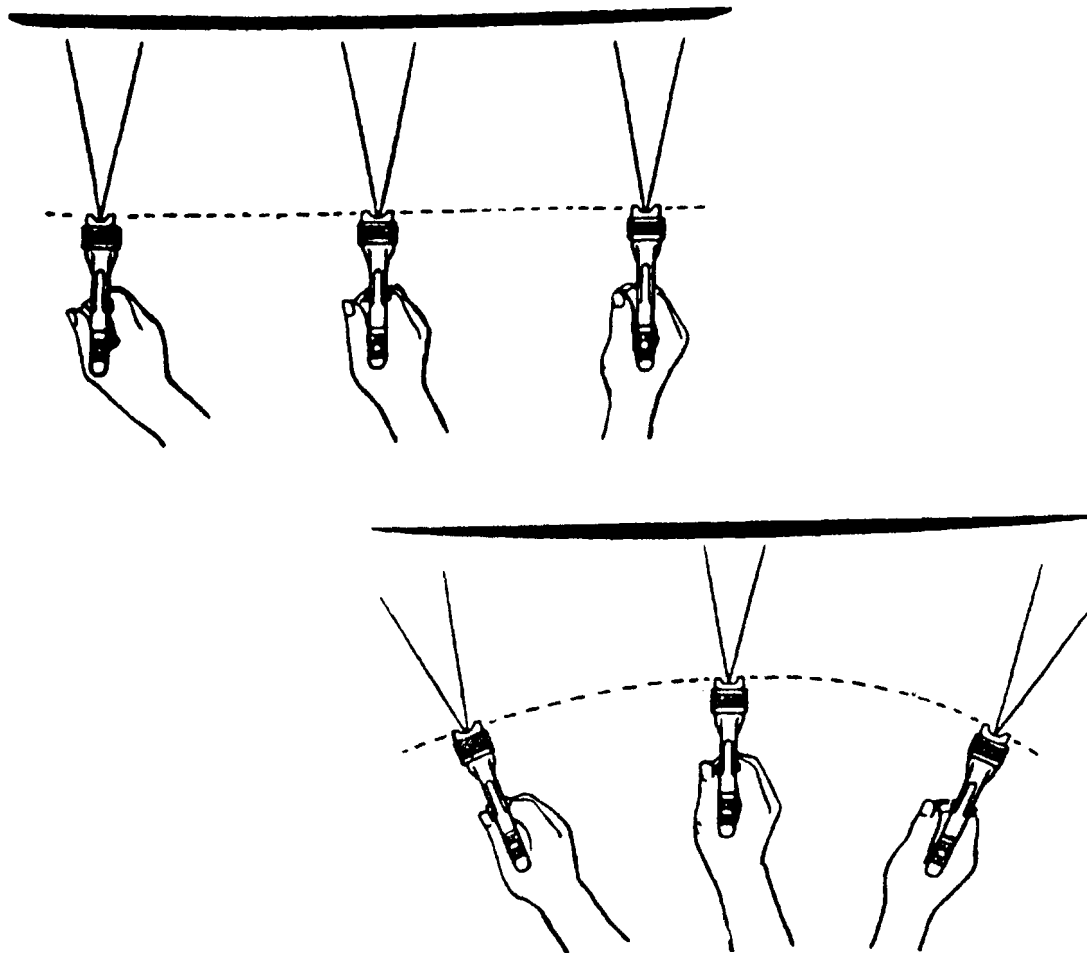


Figura 62.- Forma correcta (arriba) e incorrecta (abajo) de desplazar el soplete a lo largo de la superficie

centímetros.

b) La pistola debe desplazarse en forma completamente vertical y no inclinada (figura 61, c) y paralelamente a la superficie a pintar (figura ) y no en forma de arco, para evitar obtener películas con espesor no uniforme.

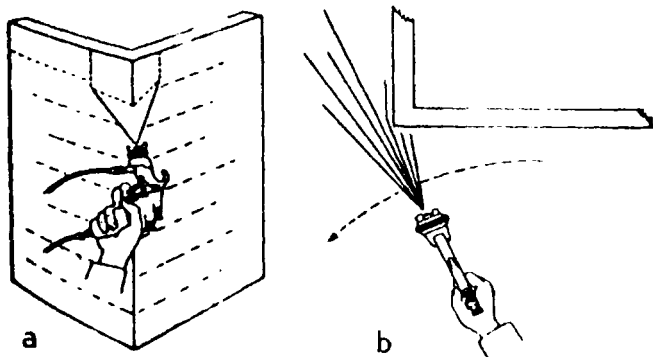


Figura 63.- Pintado de ángulos en forma correcta (a) e incorrecta (b)

c) En el caso de pintado de ángulos, la forma correcta de hacerlo es la que se indica en la figura 63, a y la forma incorrecta la presentada en b.



## RECUBRIMIENTOS DE PROTECCION TEMPORARIA

Los *recubrimientos de protección temporaria* se emplean en aquellos casos en que es necesario proteger contra la corrosión partes maquinadas especiales (armas, piezas de repuestos para equipos militares o navales) que deben ser almacenados luego de su fabricación y hasta el momento de ensamblado, embalaje, embarque o uso, durante lapsos no determinados.

Es esencial que el agente protector sea de fácil aplicación, prevenga la corrosión y resista la oxidación. No debe reaccionar con el metal de base y podrá ser removido fácilmente, sin producir daños o alteraciones en el mismo.

### LACAS Y PELICULAS ORGANICAS

Dentro de este grupo se considerarán sólo las *películas removibles*, conocidas comúnmente con la denominación de *barnices pelables*. Se trata de una película (plástico, caucho) que recubre el objeto y que tiene poca adherencia de manera de ser quitada con facilidad. Debe poseer una cierta resistencia a la abrasión.

Los materiales más empleados en la fabricación de estos barnices pelables son polímeros vinílicos, acetato de celulosa, etil celulosa o acetobutirato de celulosa.

Se pueden aplicar por medio de soplete o por inmersión y el espesor mínimo necesario para que manifiesten efecto protector es de 25 micrones, cuando se trata de grandes estructuras. En el caso de piezas pequeñas que deban ser almacenadas mucho tiempo puede llegarse hasta 100 micrones.

Dentro de este grupo se pueden incluir las películas de látex, que deben ser formuladas incorporando un inhibidor (benzoato de sodio, nitrito de sodio, etc.) pues de lo contrario provocan oxidación del metal. Se pueden aplicar con soplete o por inmersión; la película final tiene un espesor similar al de los casos anteriores y buena resistencia a la abrasión.

### INHIBIDORES EN FASE GASEOSA

Son mezclas de compuestos orgánicos, de alta presión de vapor, que actúan como inhibidores de adsorción. Su aplicación no

PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE ACEITES Y CERAS PARA PROTECCION TEMPORARIA DEL ACERO

Tipo:	Aceites	Disolvente	Emulsión	Cera
Empleo.....	Todas se aplican generalmente sobre metales ferrosos; deben usarse con extremo cuidado sobre los no ferrosos			
Composición.....	Aceites minerales de varias viscosidades; forman una capa cuyo espesor depende de la viscosidad	Materiales formadores de película derivados de petróleo, con inhibidores disueltos; película dura o blanda según composición	Preventivos de la corrosión derivados de petróleo modificados para formar emulsiones estables mezclados con agua	Capa cerosa, blanda o firme según composición del material empleado
Métodos de aplicación.....	Se aplican a pincel o también mediante el empleo de soplete o por inmersión de la pieza en el producto considerado			Luego de calentados, se aplican a pincel, inmersión o soplete.
Aspecto.....	Película oleosa, transparente	Película que varía de negra cubriente a transparente	Película oleosa transparente a ligeramente oscura	Película transparente, ámbar, marrón o negra
Espesor, micrones (µm).....	Varía entre 5,0 y 7,5	Varía entre 5,0 y 10; ocasionalmente 50	Del orden de 5 micrones	Varía entre 40 y 80
Pretratamiento antes de aplicar.....	Se debe realizar limpieza alcalina, con disolventes o con emulsiones; las superficies herrumbreadas deben ser limpiadas mecánicamente o con ácidos; los recubrimiento tipo emulsión pueden aplicarse directamente			
Forma de remoción o eliminación.....	Lavado con disolventes, desengrasado con vapor, sopleteado con emulsiones o lavado alcalino	Lavado con disolventes o con álcalis	Lavado con disolventes diversos	Lavado con disolventes o limpieza alcalina
Para servicio en.....	Interiores, exclusivamente	Interiores, ocasionalmente en exteriores	Interiores, exclusivamente	Interiores o exteriores indistintamente
Duración estimada.....	4 a 6 meses, según ambiente	Desde 4 meses a dos años	Desde 1 hasta 2 años	3 años, interior; 1-2 en exteriores

se realiza necesariamente sobre la superficie a proteger sino que con los mismos se impregna el papel de embalaje de la pieza (contenido aproximado de inhibidor, 10 g/m<sup>2</sup>). Son efectivos en ambientes cerrados y se aconseja su empleo cuando se transportan cargas por medio de contenedores ("containers"), que se ubican en la cubierta de los buques y quedan expuestos al ambiente marino.

Los compuestos más usualmente empleados son aminas o nitritos, ésteres de ácidos carboxílicos, nitrocompuestos heterocíclicos, cromatos y benzoatos, etc.

## RECUBRIMIENTOS DE CONVERSION

Se emplean fundamentalmente como pretratamiento. Ofrecen buena resistencia a la oxidación atmosférica y dentro de este grupo se incluyen el fosfatizado, el uso de cromatos y de oxalatos, etc. La película que se forma tiene espesores del orden de pocos micrones.

## ACEITES Y CERAS ANTICORROSIVAS

De acuerdo con su composición forman una capa cerosa, blanda o firme, transparente, de colores diversos, cuyo espesor varía entre 40 y 80 micrones. Pueden emplearse indistintamente en interiores o exteriores.

En la tabla de la página anterior se resumen las propiedades y características más importantes de los productos de este tipo que se utilizan para la protección temporaria del acero.



## ELECCION DE COLORES

La elección de los colores para el pintado de superficies puede, en algunos casos, estar sujeta a lo que se establece en reglamentaciones, normas, leyes o decretos, mientras que en otros queda librada al criterio personal.

### COLORES REGLAMENTARIOS

Dentro de los colores sujetos a reglamentación pueden citarse, para el caso de la Armada, el color gris para el casco y superestructura, el color negro para línea de flotación, etc. En estos casos debe cuidarse muy especialmente que los productos empleados sean muy resistentes a la luz a fin de que ésta ejerza una mínima acción de deterioro sobre la película de pintura.

### COLORES PARA AMBIENTES INDUSTRIALES

En el caso de los colores para ambientes industriales (Norma IRAM 10 005) existen también disposiciones que deben ser tenidas en cuenta y cuyo objeto es permitir la rápida identificación, señalar casos de peligrosidad, destacar partes de un equipo o disimular otros sectores del mismo.

De acuerdo con lo indicado, los colores que se mencionan a continuación tienen los significados que se expresan:

- Amarillo-negro (en franjas alternadas y a 45 grados): prevención de golpes, caídas, existencia de barreras u obstáculos importantes.
- Rojo: elementos destinados a combatir el fuego.
- Anaranjado: zonas de riesgo en máquinas o instalaciones en general.
- Verde: ubicación de elementos de seguridad.
- Azul: indicación de precaución en llaves de paso, contactos eléctricos, etc.
- Blanco, gris o negro: límite de zonas de tránsito, refugios, pasajes, etc.



## COLORES PARA CAÑERIAS

Permiten la diferenciación de las mismas según el fluido que transporten. Así se tiene:

Verde: para agua.

Marrón: para desagote de aguas servidas.

Anaranjado: vapor de agua.

Bermellón: productos para lucha contra incendios.

Amarillo: combustibles líquidos o gaseosos.

Azul: aire comprimido.

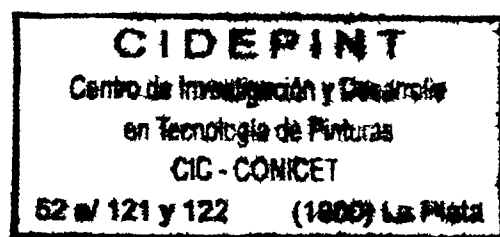
Negro: electricidad.

Este tipo de identificación es muy recomendable en laboratorios, fábricas, embarcaciones, etc., pues contribuye a la localización rápida, especialmente en los casos en que deben realizarse reparaciones urgentes.

## COLORES PARA AMBIENTES INTERIORES

Cuando los colores seleccionados quedan librados al criterio de personas, se debe cuidar de eliminar los poco atractivos, utilizando los de general aceptación y de alta reflectividad, buscando además combinaciones de colores armónicas cuando debe utilizarse más de uno. De esta manera se logran las condiciones óptimas para la percepción visual y además se crea un ambiente de confort que proporciona condiciones agradables para el trabajo, al margen del objetivo fundamental que es la preservación de locales, instalaciones y equipos.

*Este tomo se terminó de imprimir  
en la Empresa Copias 55, La Pla-  
ta, el día 7 de enero de 1981*





MANUAL FCOMAR DE  
OPERACION Y MANTENIMIENTO

SENID - 1981