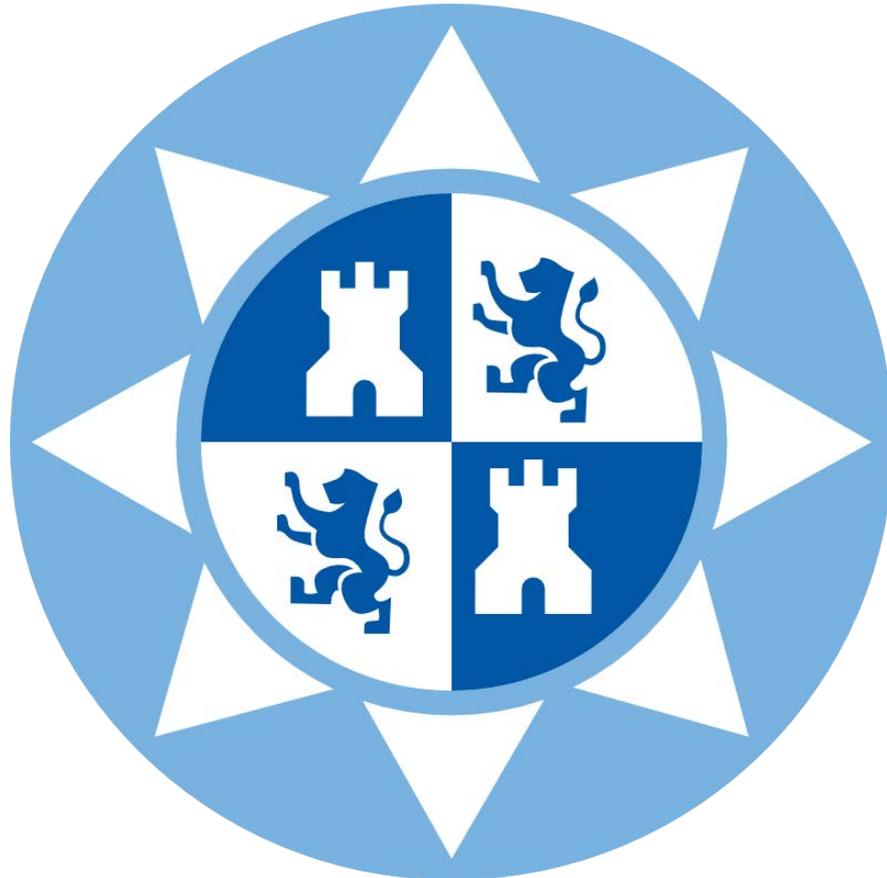


Universidad Politécnica de Cartagena

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Naval y Oceánica



Estudio de la protección contra la corrosión de una fragata

Titulación: Ingeniería Técnica Naval

Alumno: Fº José Acosta Méndez

Director: Beatriz Miguel Hernández

Co-director: José E. Gutiérrez Romero

Cartagena, Marzo de 2013

Agradecimientos:

A los directores del presente proyecto, Beatriz Miguel Hernández y José Enrique Gutiérrez Romero, por su ayuda y consejos a la hora de realizar este proyecto.

A mi familia, en especial a mis padres y hermano, por estar hay en cada momento.

Y a Blanca, por toda la ayuda prestada, motivación y paciencia mostrada hacia mí a lo largo de estos años de Universidad.

A todos ellos, gracias por todo.



Índice

	Página
Capítulo 1º. Introducción_____	4
1.0. Definición de corrosión_____	4
Capítulo 2º. Tipos y características de la corrosión_____	8
2.0. Clasificaciones de la corrosión_____	8
2.1. Corrosión galvánica_____	12
2.2. Corrosión por aireación diferencial._____	15
2.3. Corrosión selectiva_____	20
2.4. Corrosión por picadura_____	21
2.5. Corrosión inter granular_____	22
2.6. Corrosión bajo tensiones_____	23
2.7. Corrosión por fatiga_____	25
2.8. Corrosión por fricción_____	27
2.9. Corrosión de fragilización por hidrogeno_____	29
2.10. Corrosión microbiológica_____	31
2.11. Corrosión por corrientes parásitas_____	33
2.12. Corrosión por distintos elementos_____	35
Capítulo 3º: Otras consideraciones de la corrosión_____	37
3.1. Protección contra la corrosión_____	37
3.2. Trascendencia económica de la corrosión_____	39
3.3. Corrosión en ambientes marinos_____	43



Capítulo 4º: Control de la corrosión	45
4.1. Introducción	45
4.2. Protección anódica	47
4.2.1. Pinturas antioxidantes	47
4.2.2. Constituyentes de las pinturas	49
4.3. Protección catódica	51
4.3.1. Ánodos de sacrificio	52
4.3.1.1. Tipos de ánodos de sacrificio	53
4.3.2. Corriente impresa	55
4.3.2.1. Fuentes de corriente	57
4.3.2.2. Ánodos auxiliares	59
4.3.2.3. Propiedades de los ánodos auxiliares	63
4.3.2.4. Cálculo de la protección y distribución	66
4.3.2.5. Ventajas y limitaciones	68
Capítulo 5º. Estudio de los diferentes métodos	70
5.1. Barco de estudio	71
5.2. Pinturas antioxidantes	71
5.3. Ánodos de sacrificio	78
5.4. Corrientes impresas	88
Capítulo 6º: Conclusión final	93
Capítulo 7º: Anexos	95
7.1. Barco de estudio	95
7.2. Planos de formas	96
7.2.1. Vista transversal	96
7.2.2. Vista en planta	97
7.2.3. Vista longitudinal	98



7.2.4. Disposición general	99
7.3. Pinturas	100
7.4. Ánodo	108
Capítulo 8º: Bibliografía	109



Capítulo 1º: Introducción

1.0. Definición de corrosión

Los materiales, y en especial los metales, son obtenidos a partir de especies minerales estables en las condiciones naturales. Por tanto, al ser expuesto a las condiciones ambientales, una vez extraídos, tienden a estabilizarse química y energéticamente. El paso espontáneo de estos materiales a su estado natural combinado es llamado *corrosión*.

Corrosión es el ataque destructivo de un metal por reacción química o electroquímica con su medio ambiente. Los daños causados por medios físicos no se denominan corrosión sino erosión, abrasión o desgaste. La corrosión, por tanto, es un proceso a veces inevitable, cuya prevención es difícil, pero sobre el que es posible y practicable un control y una protección contra el mismo.

El proceso de la corrosión (reacción anódica), como muestra la Figura 1, el metal disuelto en iones genera algunos electrones, que son consumidos en un proceso secundario (reacción catódica). Estos dos procesos tienen que compensar sus cargas. Los lugares en los que ocurren estos dos procesos se pueden situar muy cerca, en la superficie del metal, o más lejos dependiendo de las circunstancias. Esta simple observación tiene un impacto importante en muchos aspectos de la prevención y del control de la corrosión, ya que nos permite diseñar nuevas técnicas de observación de la corrosión y así evitar las formas más localizadas de corrosión.

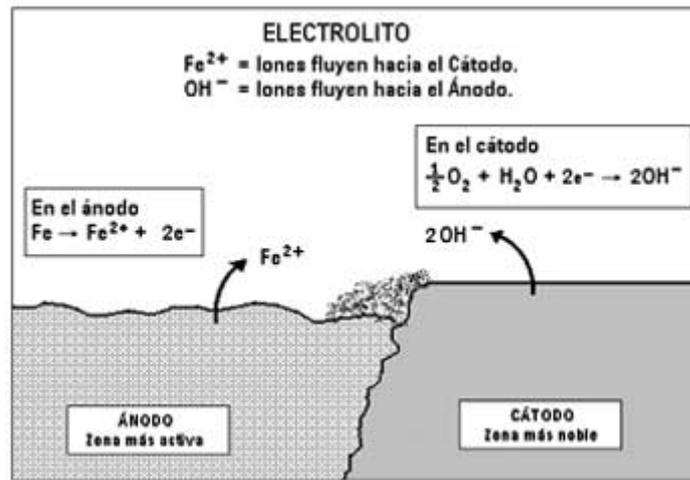


Fig.1: Explicación gráfica de la corrosión

Los electrones producidos por la reacción catódica cercana a la reacción de corrosión necesitarán ser consumidos por una reacción catódica cercana a la reacción de corrosión. Los electrones y los iones de hidrógeno reaccionan para formar primero átomos de hidrógeno y luego la molécula de gas de hidrógeno. Si el nivel de la acidez es alto (pH bajo), este hidrógeno molecular se convertirá fácilmente en un gas como se puede demostrar exponiendo una tira de cinc en una solución de ácido sulfúrico.

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

El estudio de esta corriente eléctrica, a partir de estudio comparativos entre los distintos componentes, bajo unas condiciones estándares (25°C y 1 bar), y contra una semipila de referencia (H^{+} / H_2 en agua y electrodo de Ti / Pt) permite conocer la espontaneidad de las reacciones de corrosión, y por tanto, la estabilidad de las fase minerales.



En la mayoría de medios naturales, la presencia de agua es un factor detestable. Por tanto, el estudio de los procesos de corrosión naturales deberá centrarse en el de las reacciones en medios acuosos.

Una buena aproximación para el estudio del comportamiento de los distintos materiales en medio acuoso lo constituyen los diagramas de *Pourbaix*, representado en la Figura 2. En estos, se observan distintas zonas de estabilidad, entre las que cabe destacar las de *inmunidad*, de *corrosión activa* y de *pasividad*.

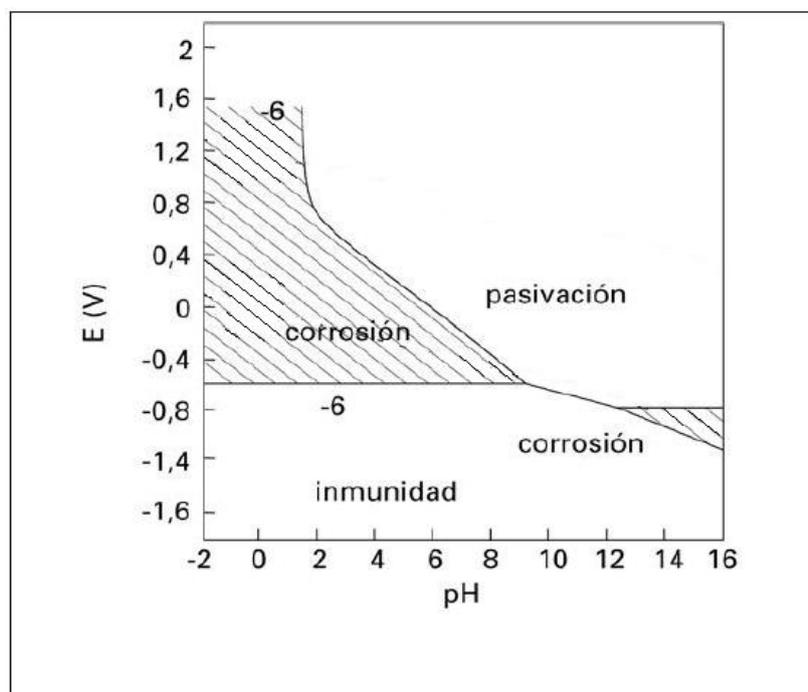


Fig.2: Diagrama de Pourbaix

La zona de inmunidad, o zona de predominio de las reacciones de reducción, corresponde a la zona donde el material se encuentra en condiciones estables.

La zona de corrosión activa se caracteriza por el predominio de las reacciones de oxidación, que acusan la destrucción por combinación o disolución continuada del material. El límite entre la zona de inmunidad y la de corrosión activa es gradual, al igual que con la de pasividad.



La zona de paliación, corresponde a una zona de corrosión, donde la fase formada constituye una película protectora, que evita el avance del proceso de corrosión. La formación de imperfecciones en la misma (pasivación imperfecta) conlleva la aparición de corrosiones locales (por ejemplo, de picaduras).

Pueden estudiarse para los metales las zonas de inmunidad, de corrosión activa, y de pasivación, pudiendo determinarse para cada caso las condiciones de Eh-pH que supone tal comportamiento, lo que ayudará en cada caso concreto a diseñar estrategias adecuadas de lucha contra la corrosión.



Capítulo 2º: Tipos de corrosión y características.

2.0. Clasificaciones de la corrosión.

Con frecuencia se piensa que la corrosión se reduce a los fenómenos de formación de herrumbre o al empañado o pérdida de brillo que sufren los metales. Sin embargo, la corrosión también actúa de otras maneras que pueden conducir, por ejemplo, a que un metal falle por agrietamiento o a la pérdida de su resistencia o ductilidad. En general, y salvo algunas pocas excepciones, cada uno de los tipos de corrosión se produce por procesos electroquímicos, aunque no siempre se forman productos de corrosión visibles ni el metal sufre pérdidas de peso apreciables.

Los tipos principales de corrosión clasificados por su aspecto externo o por las alteraciones que causan en las propiedades físicas de los metales son los siguientes:

- **Ataque uniforme:** Incluye los tipos de corrosión tan conocidos como la formación de herrumbre en el hierro y el empañado de la plata. También son ejemplos el empañado del níquel y la oxidación de los metales a altas temperaturas.
- **Picaduras:** Se denomina así al tipo de ataque local que se forma debido a que la velocidad de la corrosión es mayor en unas zonas que en otras. Si se produce un ataque apreciable confinado a un área fija del metal relativamente pequeña, que actúa como ánodo, las picaduras que resultan se definen como profundas. Si el área de ataque es relativamente grande y no tan profunda las picaduras se consideran superficiales. En ocasiones se expresa la profundidad de las picaduras como factor de picadura. Cuando el factor de picadura es la unidad



representa un ataque uniforme. El hierro enterrado en el suelo se corroe con formación de picaduras superficiales mientras los aceros sumergidos en agua de mar sufren una corrosión característica con formación de picaduras profundas. Muchos metales cuando están expuestos a líquidos que se mueven a velocidades elevadas sufren una corrosión del tipo de picadura llamada ataque por cavitación, y también erosión-corrosión.

La corrosión por fricción o roce se produce por un movimiento relativamente pequeño (como el que produce la vibración), de dos sustancias en contacto, de las que una o ambas son metales, y conduce por lo general a la formación de una serie de picaduras en la cara de contacto del metal.

La cavitación se produce por la formación y colapso de burbujas de vapor en la superficie dinámica de contacto metal-líquido, causa una serie de picaduras que algunas veces se asemejan a un panel de fisuras de pequeña profundidad relativa.

- Descincado y corrosión selectiva: Es un tipo de ataque que ocurre en las aleaciones de cinc, en las cuales el cinc se corroe con preferencia, dejando un residuo poroso y residuos de corrosión.

La corrosión selectiva es similar al descincado en que uno o más componentes reactivos de la aleación se corroen preferentemente, dejando un residuo poroso que puede conservar la forma primitiva de la aleación. Este tipo de corrosión está limitado por lo general, a las aleaciones de los metales nobles.

- Corrosión intergranular: Es un tipo de ataque localizado que ocurre en los espacios que limitan los granos de un metal y que produce pérdida de la resistencia mecánica y de la ductilidad. El material, de área limitada, que forma los espacios intergranulares, y que actúa como ánodo, está en contacto con las superficies de los granos que son más grandes y actúan como cátodos. Este



ataque suele ser, con frecuencia, rápido, penetra con profundidad en el metal y algunas veces causa averías catastróficas. Entre las aleaciones sujetas a la corrosión intergranular se cuentan los aceros inoxidable que han sufrido un tratamiento térmico de inadecuado y las aleaciones de tipo Duraluminio.

- **Agrietamiento:** Si un metal se agrieta cuando está sujeto a tensiones de tracción repetidas o alternativas en un medio corrosivo, se dice que ha fallado por corrosión bajo fatiga. Cuando el medio no es corrosivo, el metal sometido a tensiones de manera similar, pero a valores inferiores a la tensión crítica denominada límite de fatiga, no fallara por fatiga ni aun después de un número infinito de ciclos. En un medio ambiente corrosivo no existe, por lo común, un verdadero límite de fatiga y el metal falla después de cierto número e ciclos de tensiones sin importar cuan baja sea la tensión aplicada. Las clases de medios corrosivos que producen corrosión bajo fatiga son muchas y no muy específicas.

Otro tipo de clasificación que podemos hacer de los diferentes tipos de corrosión es atendiendo a los tipos de pilas que toman parte en las reacciones de corrosión, estas son las siguientes:

- **Pilas de electrodos diferenciales:** Son ejemplos de este tipo de pila de corrosión, un metal que contiene en la superficie como fase separada impurezas conductoras de electricidad, o una tubería de cobre conectada a una tubería de hierro, o una hélice de bronce en contacto con el casco de acero de un buque. También incluyen estas pilas las formadas por un metal conformado en frío en contacto con el mismo metal recocido, o los espacios de las uniones intergranulares en contacto con los granos, o un cristal de un solo metal en contacto con otro cristal de diferente orientación.



- Pilas de concentración: Este tipo de pila tiene dos electrodos idénticos, cada uno de ellos en contacto con una solución de diferente composición. Hay dos clases de estas pilas, la pila de concentración salina, cuando un electrodo de cobre está expuesto a una solución concentrada de sulfato de cobre y el otro a una solución diluida, también de sulfato de cobre. La segunda clase de pila de concentración, que en la práctica es la más importante, es la conocida como pila de concentración diferencial. Puede estar formada, por ejemplo, por dos electrodos de hierro en solución diluida de CINA, en la que el electrolito que rodea a un electrodo esta aireado por una inyección de aire (cátodo) y el otro desaireado (ánodo) por medio, por ejemplo, de una corriente de nitrógeno inyectado al electrolito.
- Pilas de temperatura diferencial: Los componentes de estas pilas son electrodos del mismo metal, cada uno de los cuales está a temperatura diferente, sumergido en un electrolito de la misma composición inicial. Acerca de la importancia practica y la teoría fundamental de estas pilas se conoce menos que sobre las pilas ya descritas. Se suelen dar en los termopermutadores, calderas, calentadores de inmersión y equipos similares.

2.1. Corrosión galvánica.

La corrosión Galvánica (Figura 3) es una de las más comunes que se pueden encontrar. Se produce cuando metales distintos se unen eléctricamente en presencia de un electrolito (Sustancia que se somete a la electrolisis, una descomposición de sustancia en disolución mediante la corriente eléctrica.)

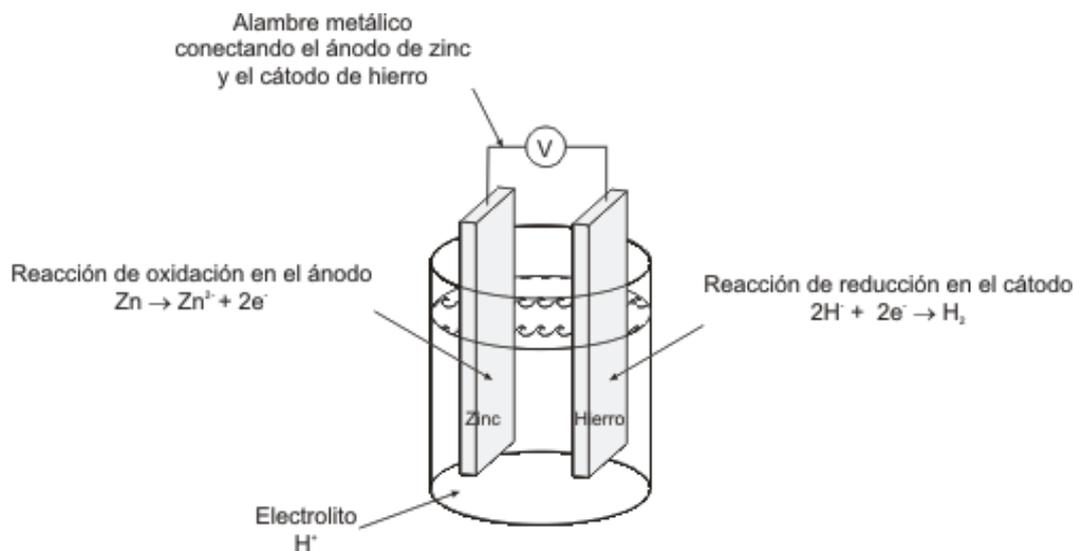


Fig.3: Corrosión galvánica en dos metales diferentes.

En cuanto a la formación de la pila galvánica, cuando mayor es la diferencia de potencial, mayor es la conductividad del electrolito favoreciendo así, la corrosión galvánica, como se aprecia en la Figura 4. Y si la diferencia de potencial es pequeña el electrolito es muy resistente disminuyendo así la distancia a partir de la zona de unión. Por ello es importante el disponer de tablas de los distintos materiales metálicos indicando su potencial para evitar en la medida de lo posible la corrosión.



Serie fem estándar		
	Reacciones de electrodo	Potencial de electrodo estándar $V^0(V)$
↑ Inactividad creciente (catódicos)	$Au^{3+} + 3e^- \longrightarrow Au$	+1.420
	$O_2 + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2H_2O$	+1.229
	$Pt^{2+} + 2e^- \longrightarrow Pt$	~+1.2
	$Ag^+ + e^- \longrightarrow Ag$	+0.800
	$Fe^{3+} + e^- \longrightarrow Fe^{2+}$	+0.771
	$O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4(OH^-)$	+0.401
	$Cu^{2+} + 2e^- \longrightarrow Cu$	+0.340
	$2H^+ + 2e^- \longrightarrow H_2$	0.000
	$Pb^{2+} + 2e^- \longrightarrow Pb$	-0.126
	$Sn^{2+} + 2e^- \longrightarrow Sn$	-0.136
↓ Actividad creciente (anódicos)	$Ni^{2+} + 2e^- \longrightarrow Ni$	-0.250
	$Co^{2+} + 2e^- \longrightarrow Co$	-0.277
	$Cd^{2+} + 2e^- \longrightarrow Cd$	-0.403
	$Fe^{2+} + 2e^- \longrightarrow Fe$	-0.440
	$Cr^{3+} + 3e^- \longrightarrow Cr$	-0.744
	$Zn^{2+} + 2e^- \longrightarrow Zn$	-0.763
	$Al^{3+} + 3e^- \longrightarrow Al$	-1.662
	$Mg^{2+} + 2e^- \longrightarrow Mg$	-2.363
	$Na^+ + e^- \longrightarrow Na$	-2.714
	$K^+ + e^- \longrightarrow K$	-2.924

Fig.4: Serie fem estándar.

El material más electronegativo aumenta su velocidad de corrosión, mientras que en el más noble disminuye. La diferencia de potencial de dos materiales puede cambiar no solo de magnitud si no también de dirección, debido a una modificación de las condiciones de trabajo tales como la temperatura, medio...

La corriente galvánica solo depende parcialmente de la diferencia de potencial entre los dos metales, pues el recorrido de las curvas de polarización anódica y catódica condiciona la intensidad de corriente disponible y por tanto la velocidad de funcionamiento de la pila galvánica. Es por ello que tenemos que observar las pendientes de las curvas de polarización (Figura 5). El punto de intersección de las dos curvas nos indica la máxima intensidad que puede pasar por la pila

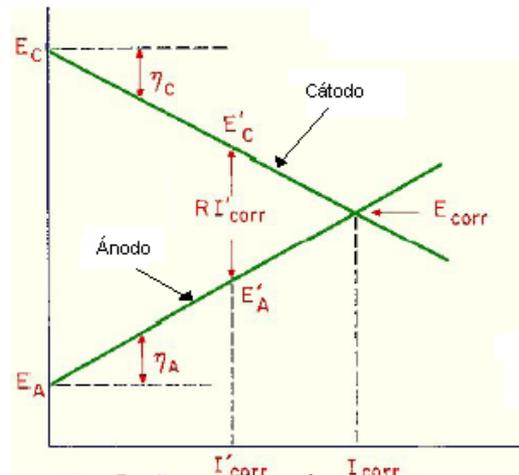


Fig.5: Curva de polarización

La relación entre las áreas expuestas influyen considerablemente. Una pequeña área anódica frente a una gran área catódica conducirá a una rápida corrosión de la anódica. Pero si es al contrario el proceso de corrosión será muy lento

Se pueden producir fenómenos de corrosión galvánica aunque en un principio no se encuentren en contacto.

Siempre que sea inevitable situar en contacto dos metales distintos hay que procurar que la relación de áreas sea favorable al ánodo y no al revés, como muestra la Figura 6.

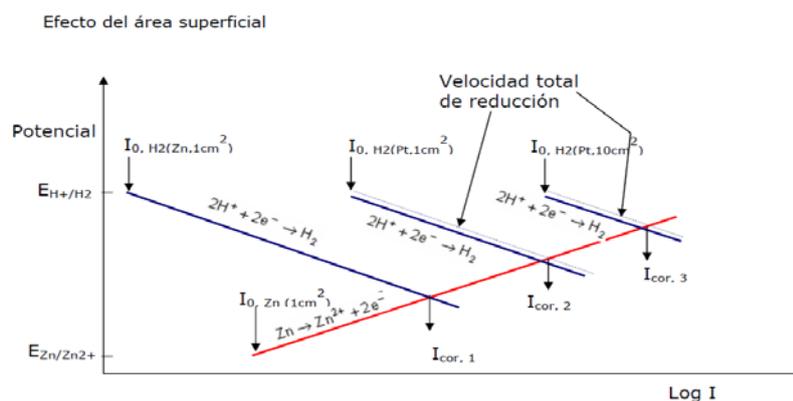


Fig.6: Relación de áreas favorables.

2.2. Corrosión por aireación diferencial.

Es un ataque localizado y se produce en recesos, cavidades, aberturas y otros espacios donde un agente corrosivo es acumulado; en general aquellas zonas en las que permitan la diferencia de concentración de oxígeno.

Se produce por la formación de una pila de aireación diferencial siendo: la zona menos aireada la zona anódica y la más aireada, la catódica.

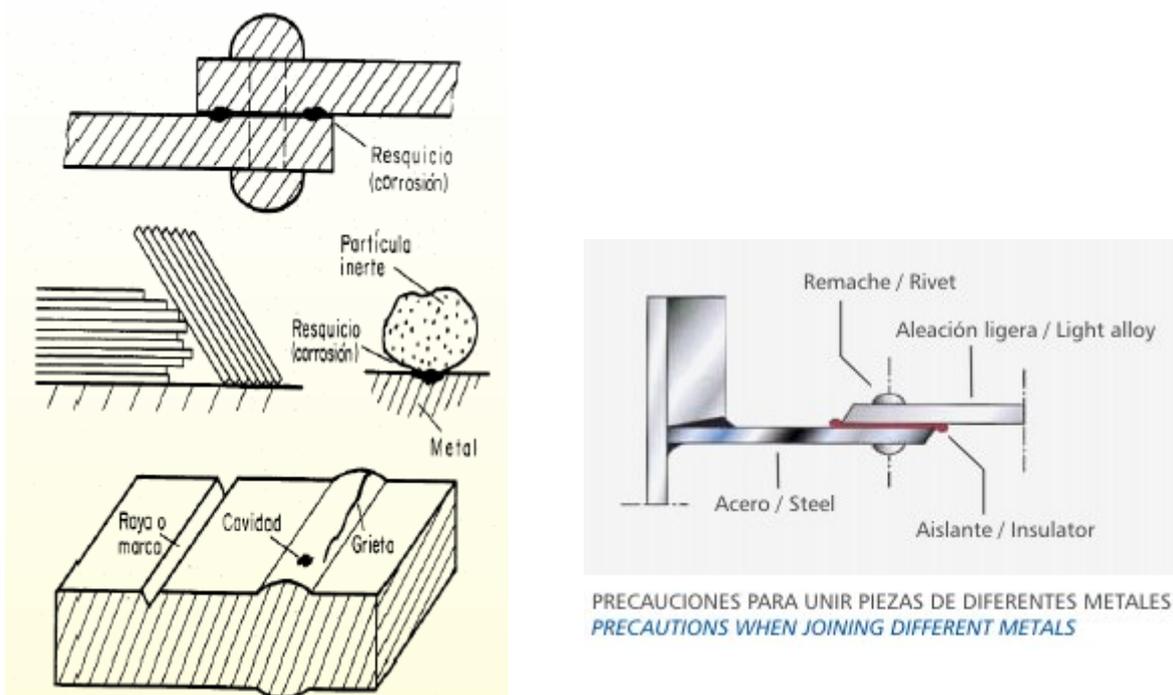


Fig.7: Precaución para unir piezas de diferentes metales.



En las partes mas aireadas (cátodos) existe una mayor concentración de oxígeno mientras que en la parte menos aireada ya sea dentro de la grieta, en los resquicios... se produce el agotamiento del oxígeno situado en el resquicio, que al tener un pequeño volumen y estar mal comunicado con el exterior no puede renovarse, desarrollándose una acidificación de la zona que provocará la aparición de un ataque al material dentro del resquicio (una pila).

No depende de la microestructura del material, su origen es fundamentalmente arquitectónico. La mejor manera de evitar este tipo de corrosión es la optimización del diseño de los componentes y de los sistemas de circulación de fluidos, de manera que se eviten zonas de movimiento nulo del fluido o de posible concentración de líquido que puedan ser motivo de un ataque.

Encontramos distintos tipos de corrosión por aireación diferencial que vamos a mostrar a continuación:

- Corrosión en la gota (Figura 8):

Se produce al estar la gota sobre la placa metálica, en este caso en la periferia de la gota encontramos O_2 abundante (reacción catódica) y en el centro de la interfase, la concentración de oxígeno es menor (zona anódica).

El producto de la corrosión forma como un anillo en la parte intermedia:

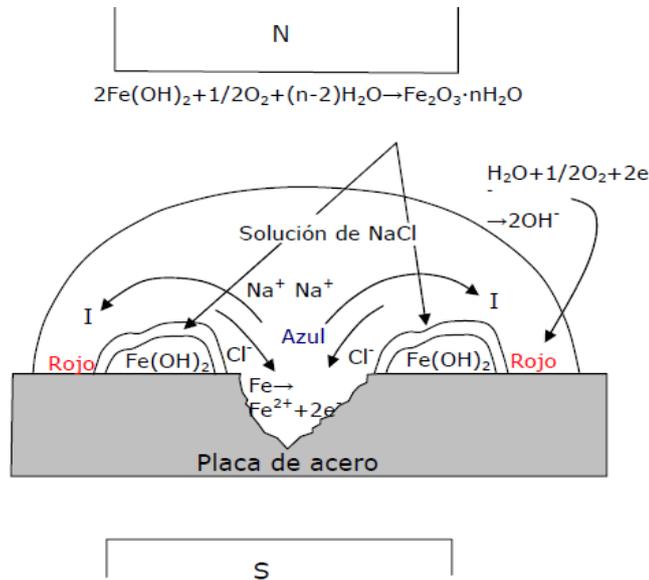


Fig.8: Anillo de corrosión en la gota.

- Ataque en hendiduras (Figura 9):

Ataque del metal en una pequeña hendidura formada por dos piezas metálicas o por una pieza metálica y otra no metálica. Dentro de las hendiduras el suministro de oxígeno es difícil (zonas anódicas) mientras que el suministro es grande en la superficie de metal expuesta (zonas catódicas).

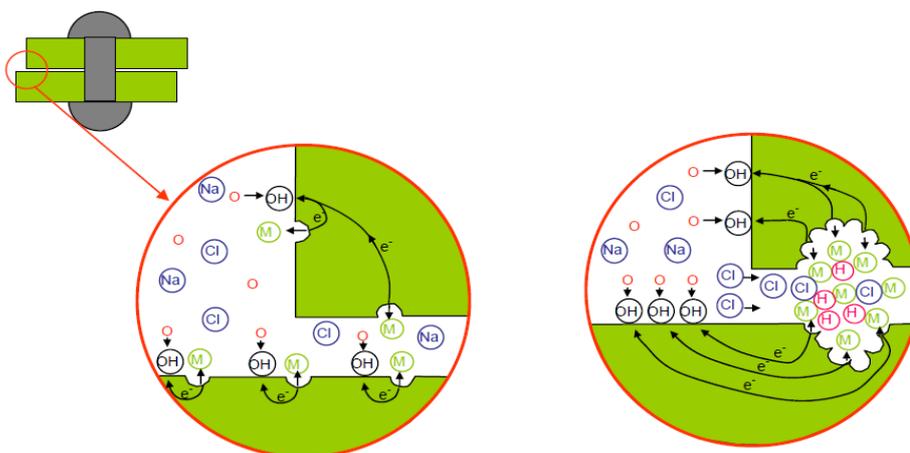


Fig.9: Ataque por hendiduras.



- Corrosión bajo depósitos:

Ocurre en agua y soluciones acuosas con depósitos de arena, hojas muertas, papel, etc. que hacen más difícil el acceso de oxígeno. La corrosión ocurre en la parte más protegida del agente corrosivo.

- Corrosión filiforme (Figura 10):

Son líneas de productos de corrosión y ocurre bajo recubrimientos de barniz, pintura o goma. Se produce al formarse gotas de disolución concentrada de electrolito bajo el recubrimiento. Estas gotas avanzan empujadas por fuerzas capilares, con corrosión en su parte central y de álcali en su periferia. Esta formación de álcali favorece el avance.



Fig.10: Corrosión filiforme.



- Corrosión en la línea de agua (Figura 11):

La corrosión produce una disminución de la concentración de oxígeno, que puede ser compensada en las cercanías de la superficie.

ÁNODO: Se localiza en la parte sumergida del material (Donde hay menos concentración de oxígeno).

CÁTODO: En la línea de agua.

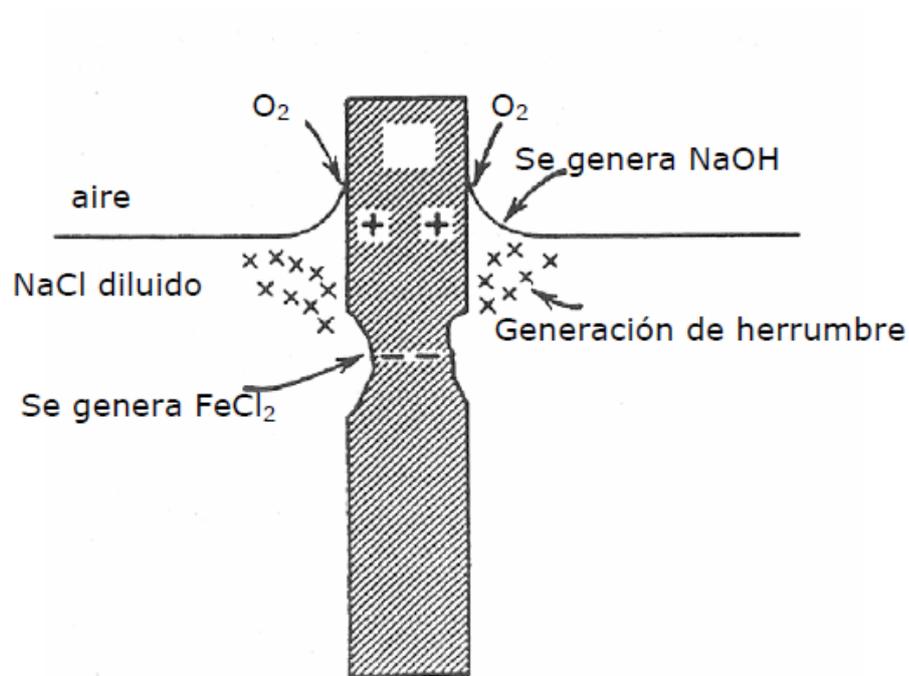


Fig.11: Corrosión en la línea de agua.

2.3. Corrosión por descincificación o selectiva.

La corrosión selectiva es un proceso muy semejante a la corrosión galvánica mientras en la corrosión galvánica una parte de un componente disuelto, en el ataque selectivo, es un elemento de una solución sólida que es disuelto en la superficie del material, esto se aprecia en la Figura 12.

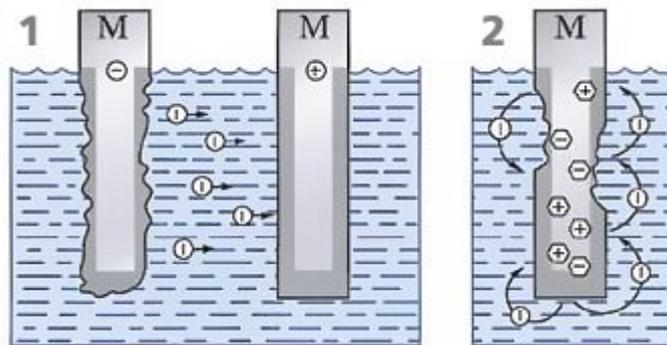


Fig.12: Corrosión selectiva.

Se produce dentro del mismo metal debido a defectos estructurales o de aleación lo que hace que la pieza se vuelva porosa y acabe de ceder. Se da con mayor frecuencia en los metales fundidos o aleaciones. Un ejemplo típico de este tipo de ataque es la descincificación de los latones, donde el cinc es disuelto quedando sobre el latón una superficie rica en cobre, como se puede ver en la Figura 13.

Descincificación del latón.

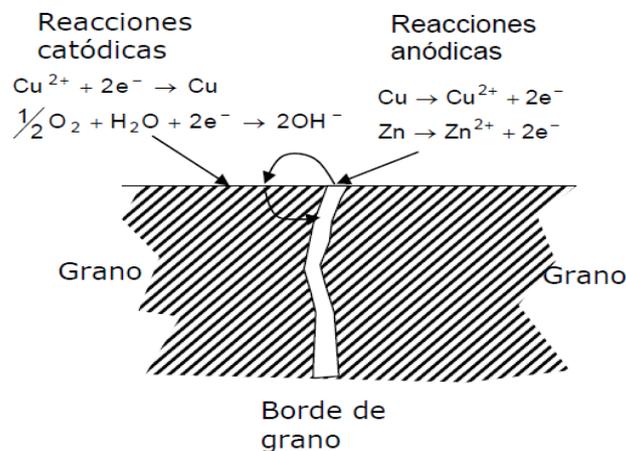


Fig.13: Descincificación del latón.



2.4. Corrosión por picadura.

La corrosión por picaduras es un ataque localizado concentrado en áreas muy reducidas. Las picaduras se inician en puntos de discontinuidad de las capas de óxido, imperfecciones o daños sufridos en la película, o cuando las condiciones del medio ambiente son propicias al fenómeno, como la aireación diferencial. En ocasiones aparecen aislados y otras veces tan agrupados que parece que den lugar a una superficie rugosa.

Una de las características especiales de las picaduras es que la reacción anódica está muy localizada en pequeños puntos, mientras que la reacción catódica tiene lugar en toda la superficie, lo que produce un proceso corrosivo muy rápido, como se ve en la Figura 14, los daños producidos pueden ser considerables, existe el riesgo de una rápida perforación.

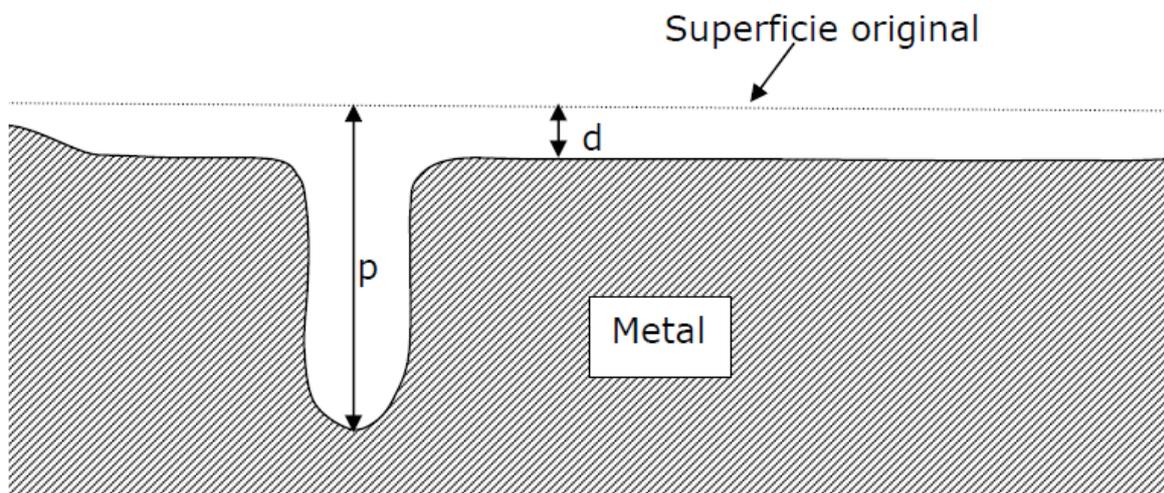


Fig.14: Corrosión por picadura.

Los puntos donde existe una mayor predisposición para la generación de picaduras son bordes de grano, puntos de emergencia de dislocaciones, inclusiones y contaminantes. Una vez generada la picadura se desarrolla por aireación diferencial.



2.5. Corrosión intergranular.

Es causada por precipitaciones en la superficie. Este tipo de corrosión es un gran peligro, ya que puede aumentar sustancialmente sin ser notada.

El borde de grano en un metal puro es más propenso al ataque que el propio grano por ser una zona de energía superficial más elevada, son puntos de unión de dos granos.

Los bordes de grano de las aleaciones son lugares donde se dan otros fenómenos que favorecen la corrosión como: impurezas, precipitaciones...

Si los componentes presentes en el borde de grano son anódicos respecto al resto del material, la corrosión se produce por disolución de estas zonas. En el caso de ser catódicos respecto al material, el ataque se localiza sobre una región inmediatamente al borde de grano, como observamos en la Figura 15.

La corrosión intergranular alcanza profundidades importantes dentro del material con una disminución de la sección resistente que pueda llevar a la destrucción de la estructura.

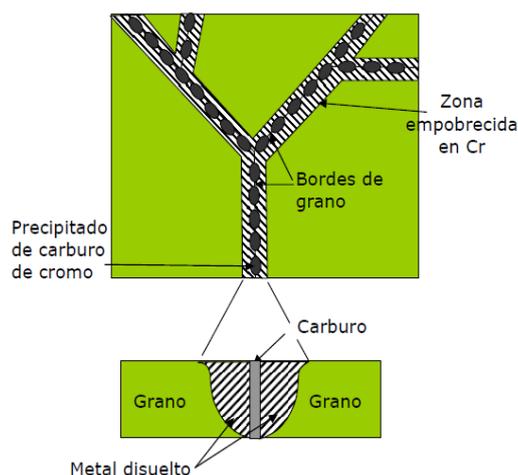


Fig.15: Corrosión intergranular.



2.6. Corrosión bajo tensiones.

El agrietamiento por corrosión bajo tensión es un fenómeno combinado. Requiere tanto la acción de una fuerza tensora como la presencia de un medio corrosivo.

Se caracteriza por la asociación de tres factores: las tensiones residuales en el material, el medio conteniendo y temperaturas. Aparecen grietas en la dirección normal a la del esfuerzo que provocan deterioros importantes en los elementos estructurales.

El agrietamiento por corrosión bajo tensión supone la existencia de un mecanismo en dos etapas:

En primer lugar, una reacción electroquímica que produce una picadura donde se elevaba localmente la tensión. La tensión necesaria para poner de manifiesto la corrosión bajo tensión puede ser bastante inferior al límite elástico.

Segundo lugar, la propagación de la grieta una corta distancia, rompiendo la capa de óxido de menor resistencia, para volver a iniciarse de nuevo la reacción electroquímica.

En material pasivable, la tensión no se produce homogéneamente a lo largo de toda la superficie si no que se concentra en el vértice de entrada donde se rompe la película pasiva y este metal deformado aumenta las corrientes anódicas que junto a los escalones que se forman en la superficie permiten la extracción de cationes provocando una velocidad alta de disolución y un avance muy rápido, como podemos ver en la Figura 16.

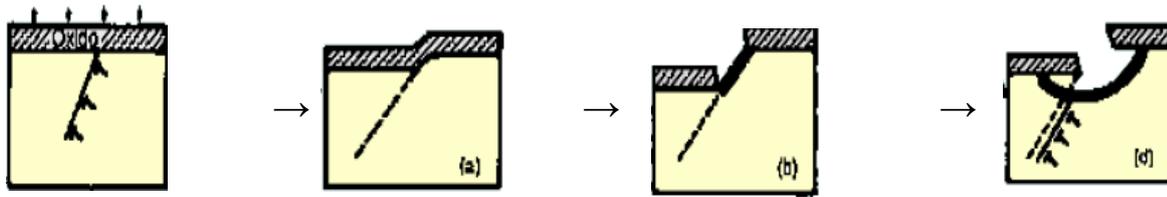


Fig.16: Corrosión bajo tensión.

Los potenciales próximos a las zonas; actividad – pasividad y la pasividad – transpasividad es donde más riesgo existe a la aparición de fenómenos de corrosión bajo tensión. Como ya hemos dicho la influencia de la temperatura es un factor a tener muy en cuenta ya que altera las características tanto químicas como mecánicas de la capa pasivada.

La rotura por corrosión bajo tensión ocurre frecuentemente sin la aparición de señales previas que pudieran servir de aviso.

2.7. Corrosión por fatiga.

La fatiga con corrosión ocurre por acción de una tensión cíclica y ataque químico simultáneo. Lógicamente los medios corrosivos tienen una influencia negativa y reducen la vida a fatiga.



Fig.17: Corrosión por fatiga.

Es principalmente transgranular y puede ir acompañado de ataques de picado. A consecuencia pueden producirse pequeñas fisuras o picaduras que se comportarán como concentradoras de tensiones originando grietas, como demuestra la Figura 17. La de propagación también aumenta en el medio corrosivo puesto que el medio corrosivo también corroerá el interior de la grieta produciendo nuevos concentradores de tensión, obsérvese en la Figura 18.

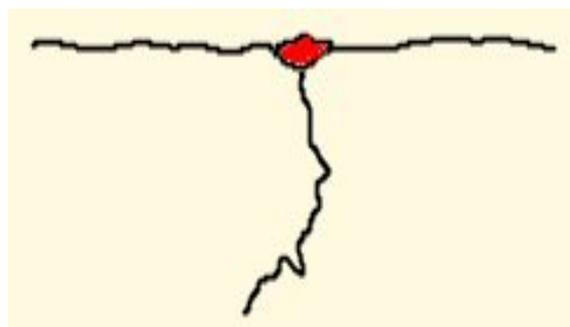


Fig.18: Fisura a consecuencia de la corrosión.



La tensión cíclica produce deslizamientos que rompen la capa pasivada o protectora, creando así áreas anódicas muy pequeñas debido al esfuerzo de deformación continúa.

2.8. Corrosión por fricción.

El movimiento relativo de un líquido corrosivo y una superficie metálica. El ataque se produce en áreas de alta velocidad o caudal turbulento. Los ataques de corrosión por erosión se caracterizan por surcos con un patrón direccional, es decir surcos o cavidades más o menos redondeadas en dirección del flujo.

- Corrosión por erosión:

Se produce por acción de un fluido en el que cualquier tipo de partícula arrastrada o sin partícula, al impactar sobre la cualquier superficie, arranca pequeños trozos de ella., cuando más impactos, más partículas arranca, como se ve en la Figura 19. Levanta las capas protectoras y el material metálico. No tiene porque ser sólo en tuberías, dos piezas entre las que exista un espacio donde se pueda “colar” una partícula se puede producir este fenómeno.

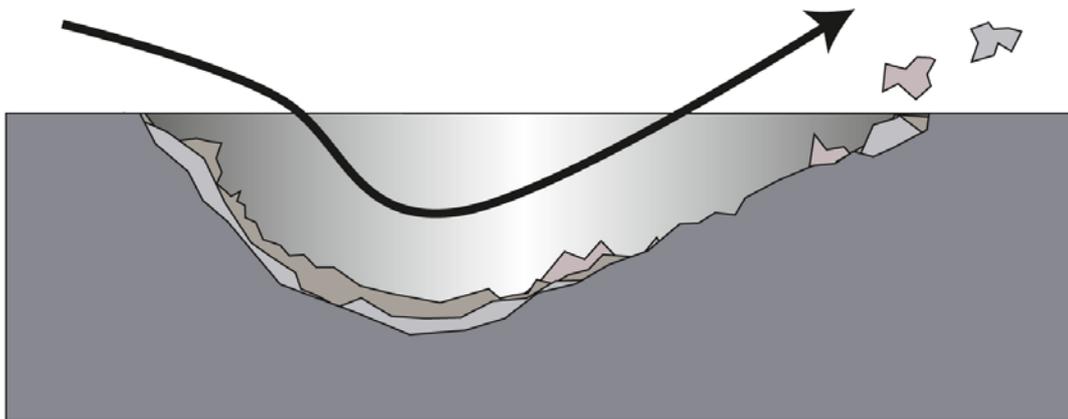


Fig.19: Corrosión por erosión.

- Corrosión por Fricción o Fretting (Figura 20):

Es la que se produce por el movimiento relativamente pequeño (como una vibración) de 2 sustancias en contacto en un ambiente húmedo, de las que una o ambas son metales. Este movimiento genera una serie de picaduras en la superficie del metal, las que son ocultadas por los productos de la corrosión y

sólo son visibles cuando ésta es removida.

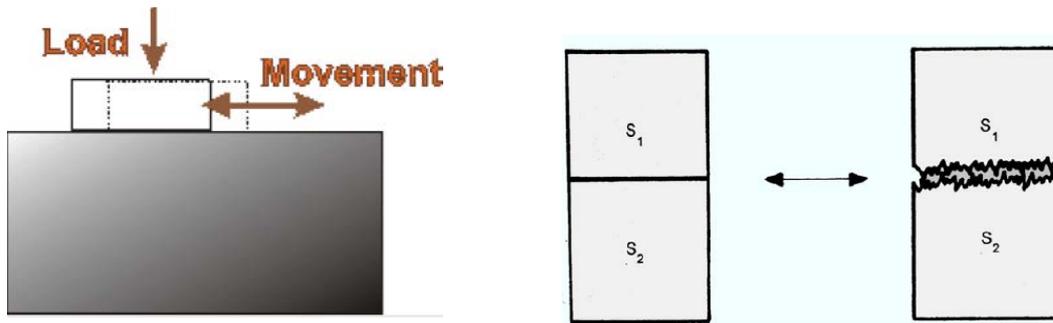


Fig.20: Corrosión por fricción.

- Corrosión por Cavitación (Figura 21)

Es la producida por la formación y colapso de burbujas en la superficie del metal (en contacto con un líquido). Aparece como consecuencia de procesos de ebullición y salida de gases con cambios bruscos de presión. Una pequeña porción de líquido en contacto con una región de baja presión provoca el cambio a vapor formándose burbujas que causan la desaparición de las capas protectoras iniciándose un proceso corrosivo muy intenso.

Genera una serie de picaduras en forma de panal. Es un fenómeno semejante al que le ocurre a las caras posteriores de las hélices de los barcos

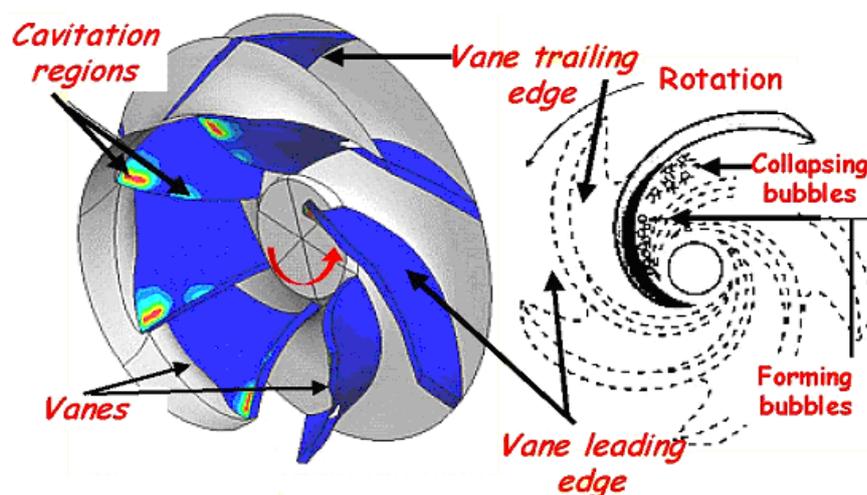


Fig.21: Corrosión por cavitación.

2.9. Corrosión por fragilización por Hidrogeno.

La morfología es semejante a la corrosión bajo tensión, pero las fisuras se propagan a una velocidad mucho mayor. Se forma “H” atómico en la superficie o en una grieta incipiente, como vemos en la Figura 22. Parte de estos átomos son absorbidos por el metal a una alta velocidad de difusión debido a su volumen atómico tan pequeño.

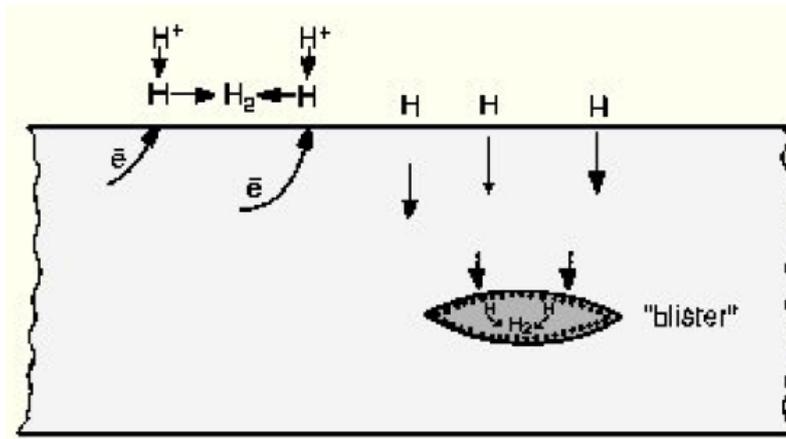


Fig.22: Corrosión por fragilización.

Al introducirse provocan la deformación de la estructura cristalina del metal provocando microfisuras en el interior del material o ampollas en la superficie de éste. Una ampolla de corrosión es una zona elevada, a menudo en forma de cúpula, ya sea como resultado de la pérdida de adherencia del recubrimiento y el metal base o del animación bajo la presión de la expansión del gas atrapado en un metal, como se puede observar en la Figura 23.

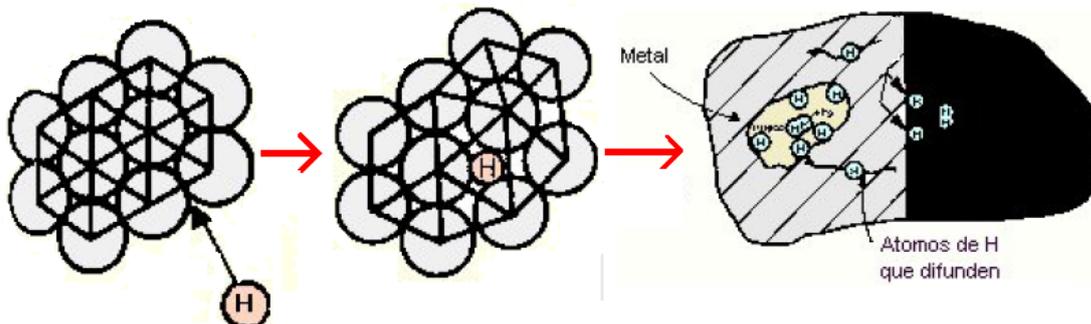


Fig.23: Gas atrapado en el metal.



La grieta se propaga discontinuamente ya que primero se produce una deformación plástica y entonces el hidrógeno (H) se difunde fragilizando el material.



2.10. Corrosión microbiológica.

Deterioro de los metales como resultado de la actividad metabólica de microorganismos. Determinados microorganismos existentes en el agua son capaces de causar corrosión en las superficies metálicas sumergidas. A este tipo de corrosión se la denomina corrosión microbiológica.

Este tipo de microorganismos, asociados generalmente al proceso de corrosión, tienen la característica común de formar parte, o participar en el ciclo del azufre de la naturaleza, en el cual coexisten dos tipos de bacterias; las oxidantes (aerobias), y las reductoras (anaerobias). Describimos ahora los distintos microorganismos:

- Algas: Aportan O_2 (fotosíntesis) \rightarrow Despolarización Catódica y aportan compuestos agresivos (metabolismo o descomposición)
- Hongos: Son aerobios y generan compuestos agresivos. El + estudiado es el “Cladosporium resinae”. En hidrocarburos, sinergia con bacterias picaduras en fondo de tanques de combustibles
- Bacterias: Encontramos varias como:

Pseudomonas: Generan mercaptanos agresivos para el Fe.

Sulfobacterias: Fotolitotrofas anaerobias: generan $S_4O_2^-$ y acidifican.

Quimiolitotrofas aerobias: generan $S_4O_2^-$ y acidifican.

Bacterias sulfatoreductoras: Anaerobias y heterótrofas Pueden vivir en condiciones adversas. Aportan S^{2-} \rightarrow Rotura de la capa pasiva, picaduras en el



Fe y sus aleaciones

Ferrobacterias: Son aerobias y oxidantes del hierro, debido a que tienen la capacidad de transformar el Fe^{2+} en Fe^{3+} , generando precipitaciones de hidróxido férrico hidratado en su superficie. Es decir una despolarización anódica.

Tuberculaciones: Distintos contenidos en O_2 dentro y fuera del tubérculo → Aireación diferencial. Interior anaerobio con bacterias sulfato reductoras, exterior aerobio

Todas estas bacterias tienen la particularidad de poder crecer en medios acuosos con altas concentraciones de sales, lo cual hace que se las encuentre frecuentemente en los mares y océanos, lagos salados y pozos de agua con alta salinidad.

Teniendo en cuenta la enorme cantidad de sales disueltas en el agua de nuestros mares, podemos afirmar que la corrosión microbiológica en los aceros sumergidos representa un fenómeno realmente importante a tener en cuenta a la hora de estudiar el tipo de recubrimientos de protección empleados en infraestructuras tales como los puentes, las plataformas petrolíferas, los buques, etc.

El problema añadido es que, una vez producida la contaminación bacteriana, aunque los materiales férricos se extraigan del medio marino, en presencia de O_2 y ambiente húmedo, el fenómeno corrosivo persiste, evidenciado por la aparición de materia orgánica.

2.11. Corrosión por corrientes parásitas.

Son aquellas que siguen caminos diferentes de los previstos en el circuito (pueden ser corrientes extrañas en el suelo). Si las corrientes de este tipo entran en una estructura, causan corrosión en el lugar del que salen para entrar de nuevo en la tierra.

Fuentes de corrientes parásitas:

- Vías y raíles electrificados
- Líneas de corriente continua enterradas
- Máquinas eléctricas de soldadura
- Sistemas de protección catódica
- Plantas de electroplateado

En el tranvía, por ejemplo, la corriente de retorno parte a través de los raíles, como se ve en la Figura 24. Parte de la corriente entra en el suelo: Contacto pobre entre los raíles o el aislamiento pobre de los raíles a tierra. Puede encontrar un camino de baja resistencia, como una conducción de gas o agua:

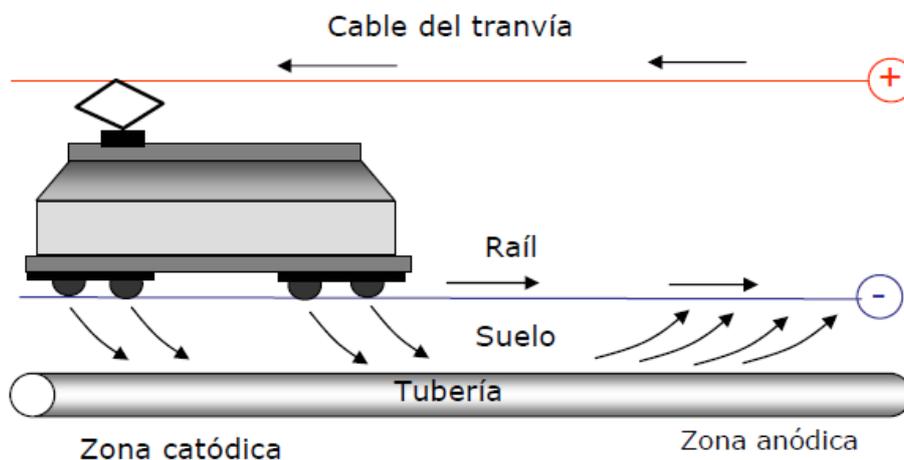


Fig.24: Corrosión por corrientes parásitas en tranvía.

Otro caso puede ser; Generador para soldadura en la línea de costa (corriente continua y toma de tierra) hasta un barco, como muestra la Figura 25. Tiene que haber una corriente de retorno; el casco se convierte en un punto de salida de corriente (ánodo). El motor generador debe estar a bordo.

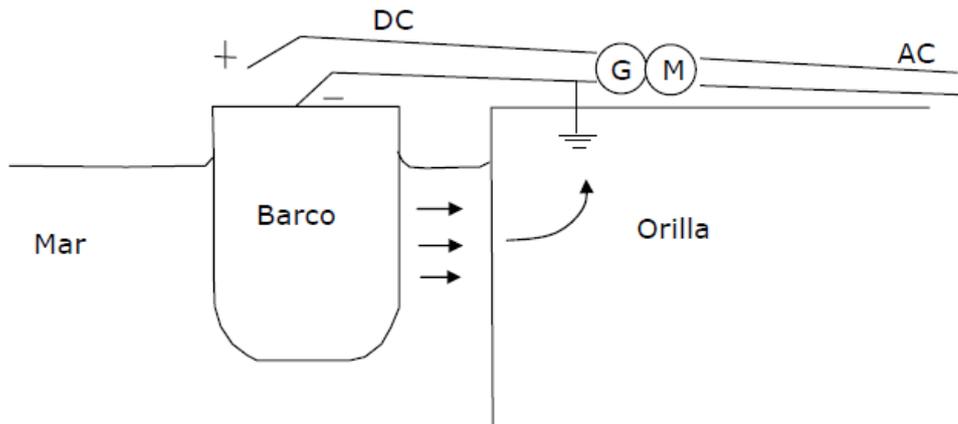


Fig.25: Corrosión por corrientes parasitas en un barco.

En tuberías también se produce este fenómeno cuando corriente fluye a través de una tubería por la que circula agua, se puede observar en la Figura 26. Como la conductividad del metal es mucho mayor que la del agua, el interior de la tubería sufre muy poca corrosión.

Tubería con juntas aislantes: mayor corrosión en el interior de las tuberías

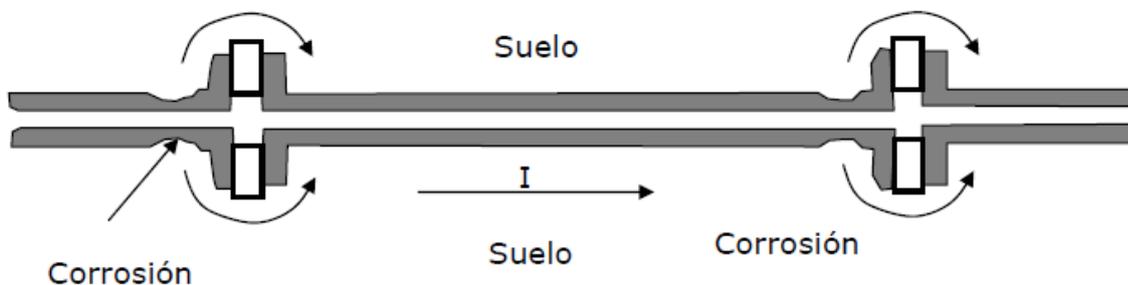


Fig.26: Corrosión por corrientes parasitas en tuberías.



2.12. Corrosión por influencia de distintos elementos.

Cromo (Cr): Es principal elemento para aleación en el acero inoxidable, ya que es esencial en la formación de la capa pasiva. Otros elementos pueden mejorar su eficacia en la formación y el mantenimiento de este recubrimiento, pero no sustituirla. Cuanto mayor es el tenor de Cr, mayor es la resistencia a la corrosión.

Níquel (Ni): Es el segundo más importante de los elementos del acero inoxidable. Eficaz para regenerar la capa pasiva (repasivación). El Ni estabiliza la austenita en la temperatura ambiente, mejorando la resistencia a la corrosión, y potencializando la viabilidad del acero inoxidable.

Molibdeno (Mo): Mezclado con cromo, es eficaz en la estabilización de la capa pasiva en la presencia de cloruros. Las adiciones de Mo aumentan la resistencia general a la corrosión, por pite y por aberturas en el acero inoxidable.

Manganeso (Mn): En cantidades moderadas, tiene el mismo efecto que en la aleación de níquel, sin embargo, el cambio de Ni con Mn no es práctico. Para mejorar la plasticidad por calor, el Mn mezcla con S (azufre) creando sulfetos de manganeso.

Carbono (C): Tenores de 0,03% de C proporcionan una mayor resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables. Es un elemento que otorga tratamiento térmico de temple de los aceros martensíticos, y promover mayor resistencia mecánica en aplicaciones por alta temperatura. El C es perjudicial a la resistencia a la corrosión debido a su reacción con Cr (Cromo), en el caso de otras aplicaciones. En los aceros ferríticos, el aumento de tenor de C provoca una disminución en la tenacidad.



Titanio (Ti), Niobio (Nb) y Tántalo (Ta): Todos estos elementos se añaden a los de aceros inoxidables por su mayor afinidad con el C, evitando la precipitación y la formación de carbonatos de cromo, lo que aumenta la resistencia a la corrosión intergranular

Nitrógeno (N): Aumenta la resistencia mecánica y resistencia a la corrosión por Pite en aceros austeníticos. Sin embargo, el N es perjudicial para las propiedades mecánicas de los aceros ferríticos

Azufre (S): El azufre puede ser añadido a los aceros inoxidables con el objetivo de mejorar su usinabilidad.

Cobre (Cu): Este elemento potencializa la resistencia a la corrosión en ambientes que contienen ácido fosfórico o sulfúrico.

Aluminio (Al): El aluminio aumenta la resistencia a la oxidación en altas temperaturas.



Capítulo 3º: Otras consideraciones de la corrosión.

3.1. Protección contra la corrosión.

Puesto que la corrosión seguirá siendo siempre una amenaza, hay muchas barreras que se pueden utilizar para proteger un sistema contra su severidad. Son muchas las técnicas empleadas para la protección contra la corrosión, ya que se adaptan a la complejidad de las reacciones que intervienen en tales procesos.

El factor determinante del problema de la corrosión, reside en la presencia no sólo de posibles riesgos de corrosión, sino de velocidades rápidas de destrucción.

Por tanto, la protección contra la corrosión deberá no sólo evitar posibles corrosiones (presencia de pares galvánicos, medios agresivos específicos, etc.) que habrá que analizar durante la fase de diseño, sino que deberá reducir también de forma drástica las velocidades de corrosión.

Las condiciones naturales no son solamente las responsables de la corrosión, sino que en muchos casos son efecto combinado de factores externos provocados por el hombre: como la presencia de agentes contaminantes en el suelo o agua, como las corrientes de fuga o vagabundas provenientes de vías férreas electrificadas, estaciones de alta y baja tensión, otros sistemas de protección catódica, equipos de soldadura, etc.

Unos de los métodos más usados para luchar contra la corrosión, son los basados en eliminar la corriente de corrosión mediante el aislamiento de los elementos a proteger o protección pasiva, y la aplicación de una corriente de



protección contraria a la de corrosión o protección catódica.



3.2. Trascendencia económica de la corrosión.

El fenómeno de la corrosión es el responsable directo de la destrucción de materiales constructivos, de los daños indirectos que esta falta provoca y de los inconvenientes que suponen su sustitución, representando así un verdadero problema económico, que según cifras oficiales, alcanza en España unos cientos de miles de millones de euros al año.

Cualquier proyecto de ingeniería emprendido por una organización motivada por los beneficios, tiene el propósito fundamental de aumentar el capital de sus propietarios o accionistas. En última instancia en la industria la gestión basa sus decisiones en este principio, incluyendo aquellas relacionadas con el control de la corrosión. La selección de proyectos óptimos desde el punto de vista del capital de los propietarios recae en el dominio financiero de las técnicas presupuestarias de capital. Estas técnicas determinan cómo el capital debería ser invertido a largo plazo.

La acertada gestión de la corrosión es una tarea desalentadora. A pesar de los notables avances en tecnología durante el siglo veinte, a menudo parece que la gestión de la corrosión no ha sido un factor a tener en cuenta. Varios estudios separaron los costes totales de la corrosión en dos partes:

- La parte del coste total de la corrosión que podría ser evitada si fueran usadas mejores prácticas de control de la corrosión.
- La parte que requieren nueva y avanzada tecnología.

Las estimaciones de los costes de corrosión evitables variaron ampliamente con una gama entre el 10 y el 40 por ciento del coste total. La mayoría de los estudios asignaron costes de la corrosión a sectores industriales o a las categorías de los



productos y de los servicios del control de la corrosión.

Ha habido estudios de muchas clases y calidades, el fin común de estos era que los costes anuales de la corrosión variaran aproximadamente entre el 1 y el 5 por ciento del producto interior bruto de cada país.

La importancia de los estudios de la corrosión es doble. En primer lugar figura el aspecto económico que comprende la reducción de las pérdidas de material que se producen por el desgaste progresivo o rotura repentina de tuberías, recipientes, componentes metálicos de máquinas, cascos de buques, estructuras marinas, etc. En segundo término hay que considerar la conservación de los recursos naturales, aplicada en principio a los metales, cuya reserva mundial es limitada, y cuyo consumo incluye las correspondientes pérdidas de reservas de energía y agua que acompañan a la producción y montaje de las estructuras metálicas.

Las pérdidas económicas se dividen en: pérdidas directas y pérdidas indirectas. Se entiende por pérdidas directas los costos de reponer estructuras y maquinaria corroída o sus partes componentes, tales como tubos condensadores, silenciadores de tubos de escape, conductos y tuberías, tejados metálicos, etc., en los que se incluye la mano de obra necesaria. Estas pérdidas también incluyen el costo extra debido al empleo de aleaciones y metales resistentes a la corrosión en aplicaciones donde el acero al carbono cumpliría las exigencias mecánicas, pero no sería utilizable por su insuficiente resistencia a la corrosión, y asimismo comprende el costo del galvanizado o niquelado del acero, el de la adición de inhibidores al agua y el de la deshumidificación de almacenes para equipos metálicos. Aunque resulta más difícil establecer las pérdidas indirectas, un breve examen de las pérdidas típicas de esta clase conduce a la conclusión de que totalizaran varios billones de euros por encima del valor de las pérdidas directas ya mencionadas. Como ejemplos de las pérdidas indirectas citaremos los siguientes:



- *Interrupciones en la producción:* Reponer una tubería corroída en la refinería de petróleo puede costar unos cientos de euros, pero la parada de la unidad e producción, como consecuencia de la avería de la tubería, puede alcanzar mientras dura la reparación, un costo de 800 euros por hora en conceptos de producción.
- *Perdidas del producto:* Aquí podemos incluir las pérdidas de petróleo, gas o agua que se producen a través de tuberías corroídas, hasta localizar la avería y hacer la reparación.
- *Perdidas de rendimiento:* Tal ocurre como consecuencia de la formación de capas acumuladas de productos de corrosión que disminuyen la transmisión de calor, o por la formación de herrumbre en el interior de tuberías que producen obstrucciones parciales y obliga por lo tanto a aumentar la capacidad de bombeo en las redes de conductos.
- *Contaminación de los productos:* Una pequeña cantidad de cobre recogido por la ligera corrosión de una tubería de cobre o de una instalación de latón, que al margen del efecto que aquí se describe puede ser resistente y duradera, puede estropear todo el jabón producido en un lote. De igual manera, la acción de algunos metales en cantidades del orden de pequeñas trazas pueden alterar el color de tintes y colorantes. Se incluye en la categoría de contaminación la inundación de alimentos que ocurre en los envases metálicos corroídos.
- *Sobremedidas:* Este factor es común en el diseño de recipientes de reacción, calderas, tubos condensadores, vástagos de bombas de extracción de pozos petrolíferos, tuberías enterradas, tanques de agua y estructuras marinas. Debido a que se desconocen las velocidades de corrosión o porque los métodos para el control de la corrosión son dudosos, e recurre con frecuencia a proyectar los



equipos o instalaciones varias veces más fuertes que lo requerido por las presiones normales de trabajo o tensiones aplicadas, con objeto de asegurar una duración razonable. Con un conocimiento apropiado de la corrosión se puede hacer un cálculo más seguro de la vida del equipo, y simplificar el diseño en lo que se refiere a materiales de trabajo.

Aunque es difícil llegar a una estimación razonable de las pérdidas totales que originan las pérdidas totales que originan las pérdidas indirectas, ni aun dentro de un solo tipo de industria, es obvio que son una parte sustancial del tributo económico impuesto por la corrosión.

Como conclusión a todo esto y comprobar la importancia de la corrosión podemos decir que aproximadamente *un cuarto de la producción mundial de acero se destina a reponer estructuras corroídas.*



3.3. Corrosión en ambientes marinos.

Muchas industrias como las navieras, productoras de combustible y gas cercanas a la costa, plantas energéticas o plantas industriales costeras usan sistemas de agua de mar. El uso más común de estos sistemas es para la refrigeración pero también se usan para combatir el fuego o también en plantas de desalinizadoras. Los problemas de la corrosión en estos sistemas han sido muy estudiados durante muchos años, pero a pesar de la información publicada sobre la conducta de los materiales bajo el efecto del agua de mar, aún ocurren fallos.

La mayoría de los elementos que se pueden encontrar en la tierra están presentes en el agua de mar, al menos en pequeñas cantidades. Sin embargo, once de los componentes únicamente suponen el 99,95% del total de los solutos, siendo los iones de cloro por mucho el componente más abundante. La concentración de los materiales disueltos en el mar varía en gran medida en función del lugar y el tiempo, porque ésta puede disminuir debido a los ríos, la lluvia o el hielo derretido, o aumentar debido a la evaporación.

La corrosión marina como todo fenómeno de corrosión en soluciones acuosas, es un proceso de naturaleza electroquímica.

Hay un flujo de electricidad de unas a otras áreas de la superficie metálica a través del electrolito, agua de mar, capaz de conducir la corriente. Como todo fenómeno electroquímico, su velocidad guardara una íntima relación con el proceso anódico, el proceso catódico y la resistencia óhmica.

El proceso anódico de disolución metálica es: $Me \rightarrow Me^{n+} + en$

Podrá verificarse sin dificultad, pues a la abundancia de electrolito se suma el



hecho de un alto contenido de ión cloruro, lo que motiva una elevada velocidad anódica con poca polarización. La elevada conductividad del agua de mar permite una rápida conducción iónica sin impedimento alguno.

El proceso catódico de reducción de moléculas de oxígeno es un factor controlable de la pila de corrosión. La corrosión marina toma la forma de ataque localizado en determinadas zonas del componente metálico, permaneciendo inalteradas las restantes.

Factores a tener en cuenta en la corrosión marina:

- El pH, en general el del agua de mar está comprendido entre 8,1 y 8,3.
- La resistividad, presenta baja resistividad y su alto contenido salino la convierte en un excelente electrolito.
- La temperatura, varía en función de la estación del año del lugar.
- La velocidad, a mayor velocidad mayor probabilidad de que aparezcan fenómenos de corrosión por turbulencia que aceleran notablemente el proceso.

Las propiedades más importantes del agua de mar son:

- Los ratios de las concentraciones de la mayoría de los componentes son notablemente constantes en todo el mundo.
- Alta concentración de sal, principalmente cloruro sódico.
- Buena conductividad eléctrica.



- PH relativamente alto y constante.
- Capacidad amortiguadora.
- Soluble para gases, de los que el Oxígeno y Dióxido de Carbono en particular son muy importantes en el contexto de la corrosión.
- Presencia de una gran cantidad de componentes orgánicos.
- Existencia de una vida biológica ya sea como microorganismos (por ejemplo bacterias, limos, etc.) o macroorganismos (por ejemplo algas, mejillones, percebes y muchos tipos de animales y peces).



Capítulo 4º: Control de la corrosión.

4.1. Introducción.

Luego de haber analizado la corrosión y sus formas, es momento de ver qué conocimientos se tienen hoy en día para prevenirla. Antes de ver un análisis un tanto más profundo a las formas de proteger sobre la corrosión, hablaremos un poco sobre la Protección Catódica y la Protección Anódica

La protección catódica ocurre cuando un metal es forzado a ser el cátodo de la celda corrosiva adhiriéndole (acoplándolo o recubriéndolo) de un metal que se corroa más fácilmente que él, de forma tal que esa capa recubridora de metal se corroa antes que el metal que está siendo protegido y así se evite la reacción corrosiva. La protección catódica se puede aplicar en metales como acero, cobre, plomo, latón y aluminio, contra la corrosión de todos los úselos, y en casi todos los medios acuosos. De igual manera, se puede eliminar el agrietamiento por corrosión bajo tensiones por corrosión, corrosión intergranular, picaduras o tanques generalizados. Como condición fundamental las estructuras componentes del objeto a proteger y del elemento de sacrificio o ayuda, deben mantenerse en contacto eléctrico o inmerso en un electrolito.

Dentro de la protección catódica encontramos: protección mediante ánodos de sacrificio y corrosión mediante corriente impresa.

Por otro lado, la protección anódica es un método similar que consiste en recubrir el metal con una fina capa de óxido para que no se corroa. Existen metales como el Aluminio que al contacto con el aire son capaces de generar



espontáneamente esta capa de óxido y por lo tanto, se hacen resistentes a la corrosión. Aun así, la capa de óxido que recubre al metal no puede ser cualquiera. Tiene que ser adherente y muy firme, ya que de lo contrario no serviría para nada. Por ejemplo, el óxido de hierro no es capaz de proteger al hierro, porque no se adquiere a él en la forma requerida.

Dentro de la protección anódica encontramos: protección mediante pinturas.



4.2. Protección anódica.

4.2.1. Pinturas antioxidantes.

La pintura protege, y lo hace interponiendo una delgada película entre el sustrato a proteger y el ambiente agresivo. Será bueno saber que el espesor total de una película de pintura no es por lo general mayor que el grosor de un papel. La vida efectiva de un recubrimiento protector depende de un número de factores, los más importantes son: El sustrato, el ambiente, la preparación de la superficie a proteger, la calidad de la pintura, la aplicación, el espesor total.



4.2.2. Constituyentes de la pintura.

Una pintura está constituida por un producto líquido, denominado vehículo y ciertos pigmentos en forma de polvo insoluble, que se dispersan en el vehículo, y algunos aditivos en pequeñas proporciones.

Fabricar una pintura consiste en mezclar de forma homogénea los mencionados elementos, en las proporciones correctas. Una pintura puede tener del orden de 400 tipos diferentes de materias primas.

Para su estudio será conveniente separar estas materias primas en diferentes grupos de acuerdo con su papel en el producto final.

Ligantes:

También llamado resinas, constituye la parte no volátil del vehículo y es responsable de la adherencia de la pintura al sustrato, así como de la cohesión de la película de pintura seca.

Disolventes:

Sirven para disolver o diluir las resinas y transformarlas en líquidos de viscosidad adecuada, constituyendo el vehículo de la pintura, del que los disolventes son la parte volátil, que se evapora durante la aplicación de la pintura y la posterior formación de la partícula seca.

Pigmentos:

Son productos sólidos en polvo que dan color y opacidad o cubrición a la película de pintura, ocultando el sustrato. Existen unos tipos de pigmentos cuya misión primordial es evitar o retardar la corrosión (pigmentos inhibidores) o bien la incrustación marina (pigmentos bio-activos).



Extendedores:

Se utilizan para dar cuerpo y relleno a la película de pintura con un coste menor y también, correctamente escogidos, para reforzar sus propiedades mecánicas y/o mejorar sus propiedades de aplicación.

Aditivos:

Se usan para mejorar y facilitar la producción, mejorar la estabilidad y la vida en el almacén de las pinturas, para reducir el tiempo de secado, contrarrestar la tendencia al lagrimeo, etc. En otras palabras, se usan para determinadas propiedades puntuales de las pinturas.



4.3. Protección catódica.

La protección catódica es una técnica de control de la corrosión, el cual aprovecha el mismo principio electroquímico de la corrosión, transportando un cátodo a una estructura metálica. Para este fin será necesaria la utilización de fuentes de energía externa mediante el empleo de ánodos galvánicos.

El mecanismo de la protección catódica, implicara la migración de electrones hacia el metal a proteger, los mismos que viajaran desde ánodos externos que estarán ubicados en sitios plenamente identificados, cumpliendo así su función. En la práctica puede aplicar protección metálica en metales como el acero, cobre, plomo, latón y aluminio en casi todos los medios acuosos.



4.3.1. Protección catódica mediante ánodos de sacrificio.

Cuando se ponen dos metales diferentes en contacto por medio del agua, se crea una corriente eléctrica entre ellos denominada corriente galvánica. La consecuencia directa de este intercambio es que el metal más sensible va a oxidarse, esta es la finalidad de los ánodos en las embarcaciones, destruirse a favor del metal menos sensible.

Si se compara el zinc (siendo el ánodo) y el bronce (para la hélice), el zinc posee un fuerte potencial eléctrico, mientras que el bronce mucho menos. Cuando el agua los pones en contacto, la corriente eléctrica así iniciada va a activar el ánodo que, al sulfatarse, protegerá la hélice.

La corriente polarizante, la suministrarán los ánodos que se desgastan en beneficio de la estructura (cátodo) que permanece inalterable.



4.3.1.1. Tipos de ánodos de sacrificio atendiendo al material usado.

Son diversos los materiales usados, sin embargo, las aleaciones de magnesio, zinc y aluminio son las más corrientes. El magnesio sin alear no puede utilizarse en sistemas de protección catódica en agua de mar, debido a su rápido deterioro, aunque si se emplean algunas de sus aleaciones.

También se utilizan ciertas aleaciones de aluminio, pero los ánodos de sacrificio más utilizados son el cinc, que no es necesario controlar y que, además, suministran una corriente continua y eficiente.

Ánodos de cinc:

Se recomienda especialmente para la protección catódica de estructura desnuda o recubierta en agua de mar o agua dulce, por lo que son muy indicados en las protecciones de los cascos de los barcos.

Los ánodos de cinc nunca producen sobreprotección, evitando daño a la pintura debido a su moderado potencial respecto al acero protegido (0,20 voltios). Los ánodos de zinc se calculan normalmente, para uno, dos o tres años de vida.

Ánodos de magnesio:

Normalmente es usado en tanques de lastre. La mayor ventaja era su rápido poder de polarización. Su inconveniente es una sobreproducción causada por la emisión de hidrógeno y su poder electroquímico, aproximadamente el 55%.

Hoy en día se usa raramente debido a las restricciones impuesta por las sociedades de clasificación. En la actualidad se usa en tanques de plataformas.



Ánodos de aluminio:

El aluminio, muestra un pequeño potencial, ya que el voltaje de condición sobre el acero polarizado viene a ser del orden de 230 a 300 mW, sin embargo, tiene una eficiencia del 80%. La experiencia indica con respecto al ánodo de zinc que la importancia de contaminación del acero es muy pequeña. El resultado del ánodo de aluminio, depende en gran medida del aditivo (indio y zinc), los cuales inmunizan la tendencia del metal a forma una película de óxido pasivadora.

Una de las ventajas del aluminio, es que en su instalación se usa solo un tercio del peso comparado con una instalación de zinc, lo que puede ser importante con respecto al peso muerto de un buque. Una desventaja de acuerdo con las sociedades de clasificación es la posibilidad de chispeo, lo que da lugar a que dichas sociedades tengan ciertas restricciones al uso de ánodos de aluminio, contrariamente a los de zinc. La distribución de los ánodos de aluminio debe estudiarse de forma que vayan colocados en zonas bajas de los tanques para así evitar la posibilidad de chispeo. Los ánodos de aluminio se calculan para una duración de cuatro años.



4.3.2. Protección catódica con corriente impresa.

El sistema de protección catódica con corriente impresa se llevó a cabo aproximadamente cien años después que el de ánodos galvánicos. En este sistema de protección catódica se utiliza la corriente suministrada por una fuente continua para imprimir la corriente necesaria para la protección de una estructura.

Este procedimiento consiste en unir eléctricamente la estructura que se trata de proteger con el polo negativo de una fuente de alimentación de corriente continua (pura o rectificada) y el positivo con un electrodo auxiliar que cierra el circuito. Los electrodos auxiliares se hacen de chatarra de hierro, aleación de ferrosilicio, grafito, titanio platinado, etc. Es completamente indispensable la existencia del electrolito (medio agresivo) que completa el conjunto para que se realice el proceso electrolítico. Este sistema de protección catódica tiene la característica de que utiliza como ánodo dispersor de la corriente (electrodo auxiliar) materiales metálicos que en mayor o menor grado se consumen con el paso de la corriente. Sin embargo, el intercambio necesario de corriente con el electrolito tiene lugar a través de reacciones electroquímicas, las cuales dependen tanto del material anódico, como del ambiente que rodea al mismo e incluso de la densidad de corriente que éste suministra.

Por ejemplo, en el caso de un ánodo de chatarra de hierro o de acero al carbono, la reacción electrónica es la de disolución del hierro:



Y por tanto, el ánodo se consume con el tiempo. Para aquellos ánodos que se pueden considerar insolubles o inertes, por ejemplo el de titanio platinado, la reacción electroquímica puede ser:



Según el ambiente y la densidad de corriente suministrada por el ánodo.

En el suelo y en las aguas naturales tiene lugar la reacción (1), mientras que en el agua de mar tiene lugar principalmente la reacción (2). Los componentes, los cuales podemos observar en la Figura 27 son:

- a) Un ánodo dispersor
- b) Una fuente de corriente continua
- c) El cable portador de la corriente

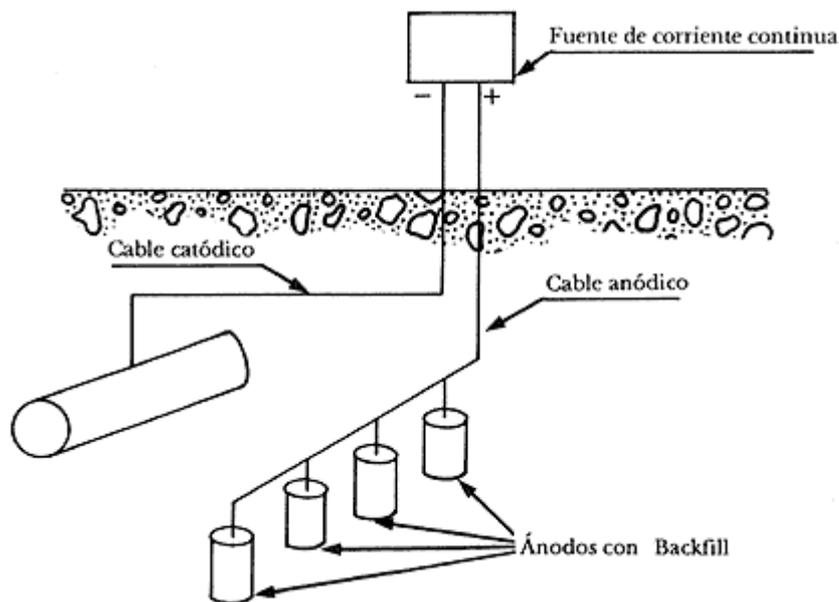


Figura 27: Esquema de protección catódica con corriente impresa de una tubería enterrada.



4.3.2.1. Fuentes de corriente.

El sistema de corriente impresa requiere de una fuente de corriente continua, no importa de dónde provenga, a condición de que se mantenga pese al paso del tiempo. Un sistema de corriente impresa debe de poder funcionar de forma permanente al menos durante diez años.

Rectificadores

Los aparatos que permiten el paso de la corriente en un solo sentido se conocen con el nombre de rectificadores.

Estos aparatos se alimentan con corriente alterna, como se ve en la Figura 28.

Si se trata de un rectificador monofásico, estará constituido por un transformador monofásico T, alimentado en el primario a 110 o 220 V (tensión de la red de distribución). La tensión de salida puede ajustarse según las necesidades. Un puente monofásico reductor P, compuesto por 4 diodos o grupos de diodos de selenio o silicio. Este puente reduce las dos alternancias de la corriente monofásica. El selenio es más barato, pero también es más frágil que el silicio.

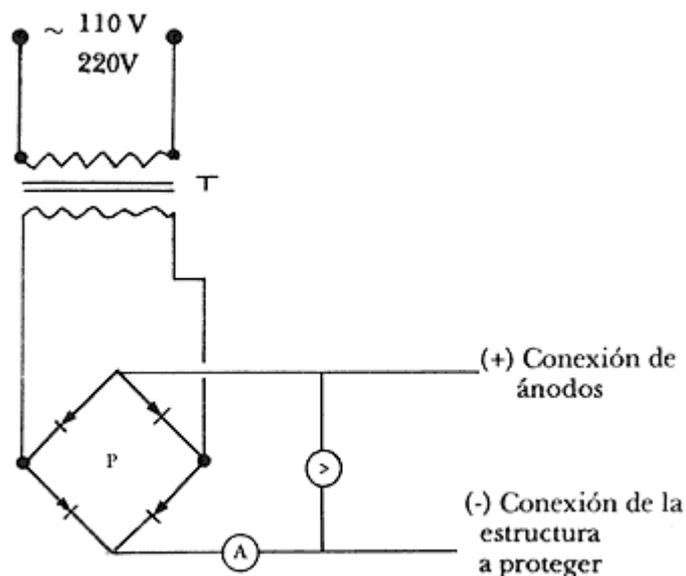


Figura 28. Esquema de un transformador rectificador monofásico.



Un voltímetro permite controlar la tensión de salida y un amperímetro la intensidad total.

La tensión de salida puede ser regulada con ayuda de regletas o por medio de un "variac", el cual permite una regulación continua desde el 0 al valor máximo.

Cuando se necesitan intensidades altas de corriente es más económico utilizar rectificadores alimentados con corriente trifásica de 380 V.

Dinamo con motor térmico

Permite la protección catódica en donde no existe posibilidad de suministrar energía eléctrica, como en el caso de los desiertos o zonas selváticas. El motor térmico puede estar alimentado, ya sea directamente a partir de la conducción que se desea proteger, ya sea por un depósito que se llena periódicamente.



4.3.2.2. Ánodos auxiliares.

Todos estos ánodos van consumiéndose a mayor o menor velocidad con el paso de la corriente. Así, por ejemplo, la chatarra de hierro se consume muy rápidamente y el titanio platinado a un ritmo muy lento. A continuación se describen brevemente cada uno de estos electrodos.

Chatarra de hierro

Por ser lo más económico, la chatarra de hierro es utilizada con frecuencia como ánodo auxiliar. Dentro de los perfiles es el carril viejo el más utilizado y, dentro de las fundiciones, la tubería.

Puede ser aconsejable la utilización de este tipo de ánodos en terrenos de resistividad elevada, y es recomendable también que se le rodee de un relleno artificial constituido por carbón de coque (con un diámetro medio de partícula de 10 mm).

El consumo medio de los lechos constituidos por perfiles de acero viene a ser de 5 kg/A-año y de 8-10 kg/A-año para la tubería de fundición.

Ferrosilicio

El ánodo de ferrosilicio es recomendable en terrenos de media y baja resistividad. Se coloca hincado o tumbado, en el suelo, y normalmente rodeado de un relleno de carbón de coque.

A intensidades bajas de corrientes (1 A), su vida es prácticamente ilimitada, y su capacidad máxima de salida de corriente es de unos 12 a 15 A por ánodo. Su consumo oscila, a intensidades de corriente altas, entre 0.1 0.3 kg/A-año.

Sus dimensiones más normales corresponden a 1 500 mm de longitud, 75 mm



de diámetro, y su peso aproximado es de 60 kg.

El ferrosilicio es muy frágil en virtud de su estructura cristalina, por lo que se ha de tener un extremo cuidado en su embalaje y transporte.

Grafito

El grafito puede utilizarse principalmente en terrenos de resistividad media, con un relleno de grafito o de carbón de coque.

Este ánodo es frágil, por lo que su transporte y embalaje debe ser cuidadoso. Sus dimensiones varían: su longitud oscila entre 1 000 y 2 000 mm y su diámetro entre 60 y 100 mm. Son más ligeros de peso que los de ferrosilicio.

La salida máxima de corriente que tienen estos ánodos es de 3 a 4 A por ánodo y su desgaste varía entre 0.5 y 1 kg/A-año.

Titanio platinado

El de titanio platinado es un ánodo especialmente indicado para instalaciones en agua de mar, aunque también es perfectamente utilizable en aguas dulces o incluso en suelos. Su característica más relevante es que con pequeños voltajes (12 V) se pueden sacar intensidades elevadas de corriente, y además, su desgaste es apenas perceptible.

En el agua de mar tiene, sin embargo, algunas limitaciones con respecto a la tensión a la que se puede aplicar, la cual nunca puede pasar de 12 V, ya que las tensiones más elevadas podrían ocasionar que se despegara la capa de óxido de titanio y que, por tanto, se deteriorara el ánodo. En aguas dulces que no tengan cloruros estos ánodos pueden actuar a tensiones de 40-50 V. La salida máxima de corriente puede ser de 3 000 A/m², y su desgaste en las condiciones más



adversas es de 0.01 g/A-año.

Su forma es diversa: pueden estar hechos en forma de una barra maciza, de tubo, chapa, alambre, etc. El platinado puede ser continuo o a intervalos, según las necesidades, y los espesores de platino pueden ser de 2.5 y 5 micras. La vida de los ánodos con 2.5 micras de espesor de platino se estima en 10 años aproximadamente y los de 5 micras duran entre 20 y 25 años.

Su resistencia mecánica es pequeña, y por simple abrasión, como en los casos de buques que naveguen por zonas que tengan arena, puede suceder que el platino desaparezca y quede el ánodo pasivada instantáneamente, y resulte, por tanto, inservible. Es éste un caso extremo, que no suele suceder, pero al menos se tiene que saber que esto puede pasar.

Tántalo platinado

El ánodo de tántalo platinado es semejante al anterior, aunque tiene sobre aquél la ventaja de que en agua de mar puede trabajar a tensiones altas (50-60 V); sin embargo, su adquisición es menos fácil y su precio es más elevado. Dado que en agua de mar y a voltajes bajos se emplean grandes intensidades de corriente, el uso de este ánodo, en general, no se justifica del todo.

Plomo-plata

La aleación plomo plata está constituida por 1% de plata y una pequeña cantidad de antimonio. El peróxido de plomo que se forma al actuar anódicamente (que tiene el color del cacao) posee unas propiedades mucho más elevadas en virtud de los elementos de aleación que se traducen en un mejor funcionamiento y duración del electrodo.

Se utiliza más frecuentemente en agua de mar, en donde la corriente máxima



de salida no pueda ser superior a 270 A/m^2 . Se desgasta entre 50 y 200 g/A-año.

Estos ánodos deben presentar una superficie plana, con lo cual se evitan en lo posible las aristas, pues en estas zonas la capa de peróxido de plomo se forma mal o no se forma, por lo que en estos puntos se puede presentar una corrosión fuerte.

Titanio-óxido de titanio y óxido de rutenio

Estos ánodos, desarrollados en Estados Unidos en 1968, están constituidos por una combinación de óxidos de titanio y de rutenio, que se adhieren a un soporte de titanio, mientras se controla el proceso a alta temperatura (700° C) Como resultado se obtiene una estructura cristalina y dura que presenta una superficie extremadamente rugosa, lo que aminora los problemas de resistencia y facilita el proceso electroquímico. Su máxima capacidad de corriente (1100 A/m^2) lo coloca a la altura de los ánodos de titanio platinado, y su costo es, aproximadamente, 20% menor.



4.3.2.3. Propiedades de los ánodos auxiliares.

Como se ha visto, los diversos tipos de materiales que se utilizan como ánodos para los sistemas de protección catódica con corriente impresa se escogen básicamente en función de sus prestaciones necesarias y del medio en que serán colocados.

En general, un buen ánodo debe poseer las propiedades siguientes:

- a) Bajo consumo
- b) densidad de corriente erogada elevada
- c) pequeñas dimensiones
- d) baja resistividad
- e) buena resistencia mecánica
- f) elevado potencial de ruptura.

Los ánodos que se utilizan en la corriente impresa pueden dividirse, en cuanto a su consumo, en: a) ánodos solubles, b) semiinertes y c) inertes. Actualmente se prefieren los inertes ya que, pese a que su costo es más alto, tienen las mejores características.



Tipo	Peso específico g/cm ³	Consumo kg/A-año	Densidad de corriente A/m ²		Utilización (medio)
			máxima	práctica	
Acero Chatarra	7.8 7.0	~9. 4.5-1	5	1	todos
Grafito	1.6	0.1-1	10-100	2.5-40	terreno, agua de mar; excluido el fondo marino y el agua dulce
Ferro-silicio: 0.95%C 16%Si, 0.75% Mn	~7	0.25-1	30-40	10-100	agua dulce, terreno
Fe-Cr-Si: 0.95%C, 0.75% Mn, 4.5%Cr, 14.5%Si	7	0.25-1	270		terreno, agua de mar, fondo marino
Pb-Ag (2% Ag)	11.3	~0.2	300	30-65	sólo agua de mar; excluido el fondo marino
Pb-Ag-Sb (1%Ag, 6%Sb)	11	~0.5	300	50-200	
Titanio platinado	4.5	8.10 ⁻⁶	400 por cada micra de pla- tino de espe- sor	500-1 000	terreno no salino con backfill, agua de mar; excluido el fondo marino y el agua dulce
Niobio platinado	8.4			500-700	
Tántalo platinado	16.6			500-1 100	
Titanio-óxido de rutenio (DSA)	4.5	5.10 ⁻⁷	1100	700-1 100	todos

Fig.29: Características de los ánodos empleados en protección catódica con corriente impresa.

En el suelo o terreno se usa principalmente la aleación **Fe-Cr-Si**, mientras que en el agua de mar se tiende a utilizar ánodos inertes del tipo **Ti/Pt** o **Ti/RuO₂** (ánodos dimensionalmente estables, DSA).

La elección de un ánodo no se hace solamente en base a su consumo o a la densidad de corriente que puede proporcionar; hay que tener en cuenta, además, sus propiedades de resistencia mecánica, su resistencia a la erosión (como en el caso de que sean utilizados en agua de mar, y sobre todo sumergidos en las inmediaciones del



mar o en el fondo marino), su facilidad de instalación, el tiempo de sustitución e incluso su disponibilidad en el mercado.

En el terreno, los ánodos pueden ser instalados en un lecho de bentonita o polvo de coque, lo cual crea un medio homogéneo, húmedo y de baja resistividad alrededor del ánodo, con lo que se aumenta su diámetro aparente y las dimensiones efectivas del ánodo, y se disminuye de esta forma la resistencia ánodo-suelo, se evitan los problemas de corrosión localizada que pueden romper el ánodo y reducir el consumo del material anódico.



4.3.2.4. Cálculo de la protección y distribución de los ánodos.

El cálculo de un sistema de protección catódica con corriente impresa es relativamente más sencillo que el de ánodos galvánicos. De hecho, no es necesario optimizar las dimensiones y peso de los ánodos para garantizar por un lado el suministro de la corriente necesaria para la protección, y por el otro la duración de los ánodos elegidos.

Una vez establecida la corriente total de protección, se elige el tipo de ánodo con base en los criterios examinados en el párrafo anterior y, teniendo en cuenta la densidad de corriente máxima que puede suministrar cada ánodo, se determina su número por exceso con respecto al teórico, para así poder obtener un mayor grado de confiabilidad.

Todavía deberá tenerse en cuenta, para lograr una protección lo más económica posible, la optimización del número y dimensiones de los ánodos, en relación con la mayor o menor resistencia total que se determine, lo que se reflejará en la potencia del generador o fuente de corriente continua y en su costo de instalación.

Para la protección de estructuras ya existentes en agua de mar (por ejemplo la protección de estructuras viejas, protegidas inicialmente con ánodos de sacrificio) la elección de pocos pero potentes ánodos remotos, o al revés, de muchos pequeños distribuidos sobre toda la estructura, puede llevar a grandes diferencias en el costo de instalación, todo ello ligado al elevado costo de la instalación submarina de los ánodos. La elección de instalar pocos ánodos resulta sin duda más económica, pero en este caso es necesario tener presente que si se instalan pocos ánodos el sistema pierde confiabilidad, pues si uno de los ánodos queda fuera de servicio, esto significará una pérdida de protección que puede oscilar entre 50 y 100%, lo cual no sucede cuando se colocan muchos ánodos pequeños distribuidos en toda la estructura.



En la ubicación de los ánodos o del lecho anódico es muy importante conocer la posición de posibles estructuras que pudieran estar presentes en las vecindades, con objeto de evitar fenómenos de interferencia que puedan provocar ataques graves de corrosión. Por ejemplo, si se debe proteger una tubería que cruza a otra se interfiere la tubería extraña. Ésta, de hecho, representa el "camino" preferible (de menor resistencia) para la corriente suministrada por los ánodos. Aquella zona de la tubería extraña que recibe la corriente queda protegida catódicamente, mientras que en aquella de la cual sale la corriente, hay corrosión. Como la mayoría de las tuberías enterradas, está además protegida con algún tipo de recubrimiento aislante, la corriente está relacionada con algún defecto del recubrimiento, por lo cual la densidad de corriente local puede resultar muy elevada y por ahí producir un ataque particularmente severo.

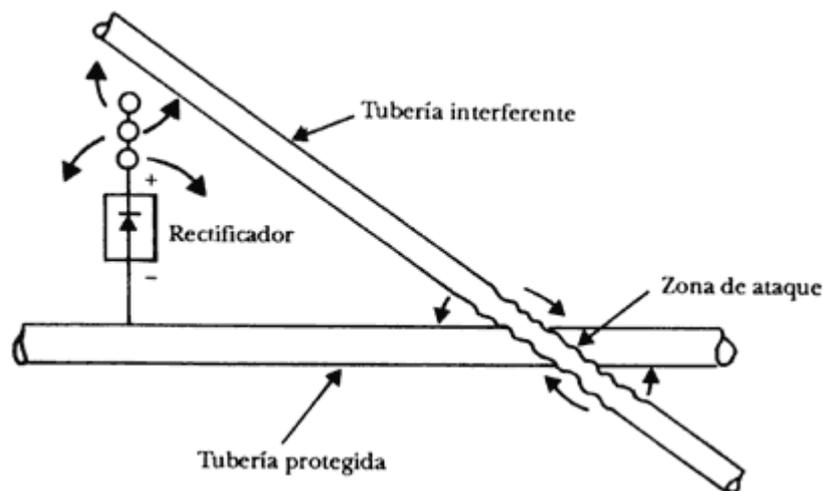


Figura 30. Ejemplo de interferencia provocada por una tubería extraña situada en la proximidad de una tubería protegida catódicamente.



4.3.2.5. Ventajas y limitaciones.

Esencialmente, se puede decir que este método es más conveniente que el de los ánodos de sacrificio, cuando se tratan de proteger estructuras muy grandes o con una gran demanda de corriente y cuando la resistividad del ambiente es elevada, como en el caso de los suelos.

Ventajas	Limitaciones
Puede diseñarse para un amplio intervalo de potencial y corriente	Puede causar problemas de interferencia.
Un ánodo o lecho anódico puede suministrar una gran corriente.	Está sujeto a rotura de la fuente de corriente
Con una sola instalación se puede proteger superficies muy grandes	Requiere de una inspección periódica y de mantenimiento
Potencial y corriente variables	Posibilidad de condiciones de sobreprotección con daños a recubrimientos y problemas de fragilización por la acción de hidrogeno
Se puede utilizar en ambientes de resistividad elevada	Conexiones y cables sujetos a roturas
Eficaz para proteger estructuras no recubiertas o mal recubiertas	Tiene un costo elevado
	Requiere de una fuente de corriente continua



Una gran ventaja de este método es su posibilidad de proteger una gran superficie con un solo ánodo. Por otra parte, tanto la diferencia de potencial como la corriente suministrada son variables y de aquí se desprende que el sistema presenta una gran flexibilidad operacional.

Este tipo de sistemas debe ser proyectado con cuidado para no causar problemas de corrientes erráticas (parásitas), las cuales pueden provocar la corrosión de estructuras vecinas.



Capítulo 5º: Estudio de los diferentes métodos

En este proyecto se ha hecho un estudio de cada uno de los diferentes métodos usados contra la corrosión externa, esto es, solo para el casco del buque.

Hemos tenido en cuenta las siguientes hipótesis:

1ª. Solo hemos tenido en cuenta la protección contra la corrosión externa. La protección interna hace referencia a las tuberías, interior del buque, etc.

2ª. Tampoco se ha tenido en cuenta la hélice, aun siendo externa.

3ª. La protección microbiológica no ha sido tratada en este estudio, aun así, ha sido puesta en el cálculo de los costes para tener una idea más aproximada del coste total. Se ha usado para los tres métodos propuestos el mismo sistema, dos capas de pintura antifouling



5.1. Barco de estudio.

El barco que he seleccionado para el estudio económico es una fragata americana, las principales características están detalladas a continuación, las demás dimensiones de la misma están detalladas en los apéndices:

Lpp	142m
Bwl	16,036m
Twl	6,15m
Superficie obra viva	2972,5m ²
Superficie obra muerta	3037,4m ²

5.2. Pinturas antioxidantes:

Especificaciones:

Barco de nueva construcción, 2972,5 m² de obra viva y 3037,4 m² de obra muerta, navegara en el mar Mediterráneo, a una velocidad de 10 nudos, intervalo de diqueado de 5 años y recorrerá una distancia media anual de 10000 millas.

Capas de pintura:

Obra viva:

- Imprimación anticorrosiva: Dos capas
- Selladora o capa barrera: Una capa
- Antifouling o patente: Dos capas.



Obra muerta:

- Imprimación anticorrosiva: Una capa.
- Selladora o capa barrera: Una capa.
- Acabado: Una capa.

Descripción del método:

-1º Lavado y desengrasado del casco:

Se utilizara agua dulce a presión de entre 150 a 200 bares junto a detergentes alcalinos. Mediante este proceso se eliminaran las sales solubles (cloruros), grasas y aceites y cualquier otro tipo de contaminante. La prueba usada para la detección de sales será la ISO 8502-6/9 (Test de Bresle)

-2º Chorro abrasivo:

La norma usada para la selección del chorro, el proceso y el acabado del acero será la norma ISO 8501-1

Dentro de esta norma, encontramos cuatro calidades para el acabado del acero (Sa1, Sa2, Sa 2 ½ y Sa3), seleccionaremos el estado de acabado del acero Sa2 ½. Este parámetro nos lo definirá el armador, en este caso, he seleccionado el acabado Sa2 ½ por ser un valor intermedio de los acabados.

Las condiciones ambientales serán el 85% de humedad relativa y una temperatura del acero de como máximo 3 grados más la temperatura de rocío (la temperatura de rocío la obtendremos del diagrama de Molliere (diagrama psicométrico)).



También será necesario definir el nivel de polvo ambiental, estando este parámetro regido bajo la norma ISO 8502-3, seleccionare un nivel 2 para el polvo

Usaremos un comparado para determinar el estado de la rugosidad máxima para el acero.

-3º Aplicación del producto:

Normalmente se usaran pistolas para las capas generales y recorte a brocha y rodillo en zonas de difícil acceso.



Selección de las pinturas:

- *Imprimación anticorrosiva: HEMPADUR®17630/ HEMPADUR®17633*

Al ser dos capas, debemos tener en cuenta que deben de ser de diferentes colores para la hora de pintar ver las zonas que faltan.

El color de la primera capa seleccionado será gris (código de la empresa para ese color será 12170) y el de la segunda capa será rojo (código de la empresa para ese color 50630)

- *Selladora o capa barrera: HEMPADUR®45182*

El color de la capa barrera es amarillo grisáceo (código de la empresa para ese color 251509)

- *Antifouling o patente: HEMPEL'S ANTIFOULING OLYMPIC®86950*

Al igual que la imprimación, al tener dos capas debemos usar dos colores diferentes.

Los colores seleccionados son para la primera capa marrón (código de la empresa para ese color 60700 y para segunda capa el color rojo (el código de la empresa para ese color será 51110)

- *Acabado: HEMPALIN®ENAMEL 52140*

El color seleccionado será el blanco (código de la empresa para ese color 10000)



Calculo de los litros de pintura:

$$\text{Litros de pintura} = \frac{\text{Area} \cdot \text{Micras secas}}{10 \cdot \% \text{ volumen de sólidos}}$$

Consumo de pintura para la obra viva.

La obra viva será de 2972,5m².

Producto	Color	Micras secas	Sólidos (%)	Margen de perdidas		
				0%	10%	30%
17633	12170	125	69	538,49	592,34	700,04
17633	50630	125	69	538,49	592,34	700,04
45182	251509	50	46	323,09	355,41	420,02
86950	60700	80	50	475,6	523,16	618,28
86950	51110	80	50	475,6	523,16	618,28

Margen de pérdidas:

El 0% se entiende por el consumo teórico, el 10% el consumo en condiciones controladas (taller) y el 30% para el pintado en dique. Estas pérdidas son debidas a la acción del viento, derrames, restos en los botes, mangueras, máquina, etc. que hacen que el consumo real sea mucho mayor que el teórico.

Tanto el color, como las micras secas y los sólidos, vienen especificados por el fabricante.



Consumo de pintura de la obra muerta:

El margen de pérdidas elegido, para el caso de obra viva, como el caso de obra muerta será del 10%, suponiendo que pintamos la fragata en un taller.

La obra muerta será de 3037m².

Producto	Color	Micras secas	Sólidos (%)	Margen de pérdidas		
				0%	10%	30%
17633	12170	125	69	550,18	605,20	715,23
45182	25150	50	46	330,11	363,12	429,14
52140	10000	40	46	264,08	290,49	343,31

Calculo del coste:

Precios:

Imprimación	6,50 €/l
Sellado	7 €/l
Antifouling	18 €/l
Acabado	5 €/l
Mano de obra	15 €/l

Coste obra viva:

$$2 \cdot (6,50 \cdot 592,3) + 7 \cdot 354,4 + 2 \cdot (18 \cdot 523,16) = 29022,11\text{€}$$



Coste obra muerta:

$$605,19 \cdot 6,5 + 363,12 \cdot 7 + 290,5 \cdot 5 = 7928,11\text{€}$$

Coste total:

Supondremos el tiempo en pintar el barco en 100 horas, con un precio de mano de obra de 15€/hora

$$\text{Coste total} = \text{Obra viva} + \text{Obra muerta} + \text{Mano de obra}$$

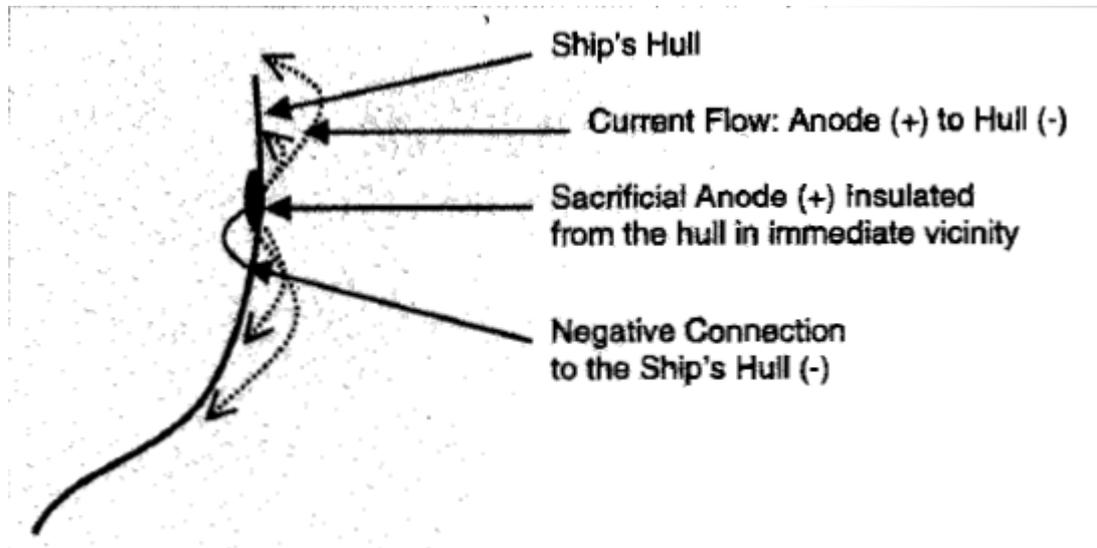
$$29022,1114 + 7928,11051 + (15 \cdot 100) = 38450,22\text{€}$$

$$\text{Coste anual: } \frac{38450,22}{5} = 7690,05 \text{ €/año}$$



5.3. Ánodos de sacrificio:

Recomendaciones prácticas para la instalación:



- 1º. Los ánodos están provistos de pletinas para su directa soldadura al casco. Las puntas de las pletinas no están galvanizadas, para evitar los gases tóxicos que se producen en el momento del montaje.
- 2º. La distribución de los ánodos debe hacerse de acuerdo a un previo diseño.
- 3º. No se deberán colocar los ánodos en el fondo debido a problemas de entrada y salida del dique.
- 4º. Nunca se deben pintar los ánodos.
- 5º. El desgaste de los ánodos debe de controlarse y nunca debe llegar a un desgaste completo.
- 6º. Se utilizaran únicamente los tornillos servidos con la pieza.



7°. Cada vez que el barco entra en dique seco, se eliminara la corrosión con un cepillo metálico.

8°. Un ánodo que no se desgasta es señal de que no cumple con su función.

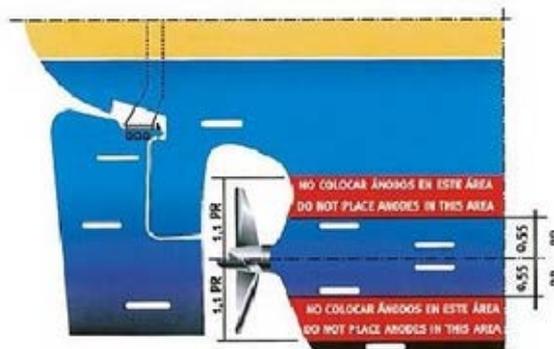
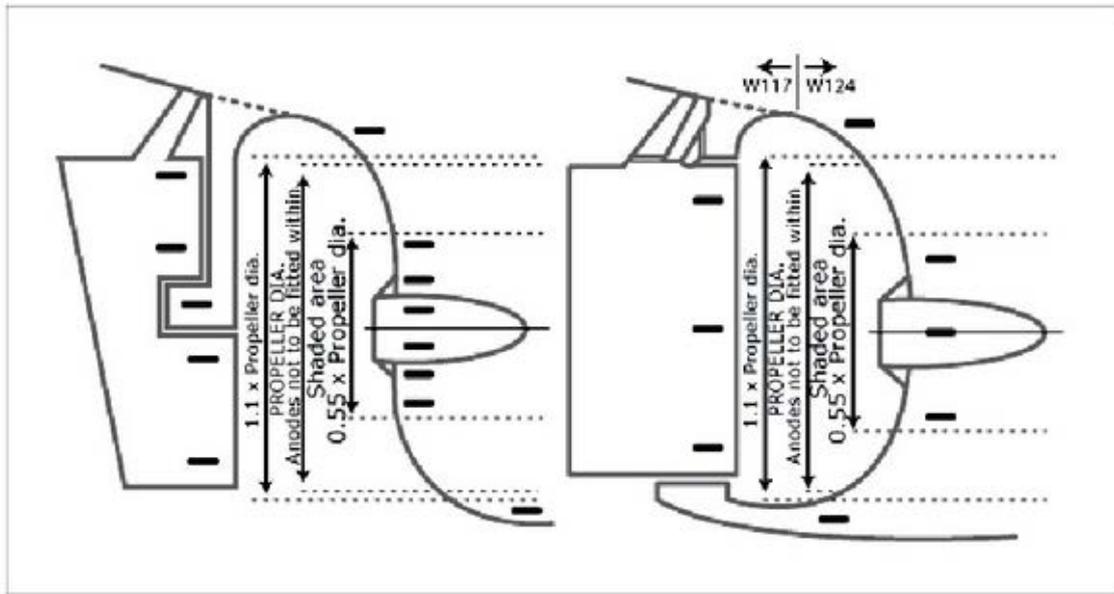
Requisitos para la instalación de ánodos en el casco:

El número de ánodos requeridos para proteger el exterior del casco en un buque específico se calcula en base a diversos factores que deben ser tomados en cuenta. Tales como tamaño, tipo de embarcación, condiciones de servicio, condición el casco, sea nuevo o que se encuentre en funcionamiento.

Después de haber determinado el número de ánodos requeridos, es muy importante asegurarse que la distribución de corrientes sea efectiva. Con la hélice situada en la popa del buque, la cual es una zona de grandes perturbaciones, es necesario colocar una mayor proporción en los ánodos en popa, específicamente cerca de la hélice. Se suele tomar como referencia que el 60% de los ánodos sean instalados en la mitad de popa.



Para las embarcaciones de más de 40.000 TPM o más, la distancia entre el timón y los ánodos no debe de exceder de 4 metros.



Debe de tenerse especial cuidado en la colocación de los ánodos colocados para evitar que existan áreas del casco situadas directamente delante de la punta del aspa de la hélice y en el área dentro de la zona exterior de la mitad del radio de la hélice. Los ánodos situados en esta posición pueden causar cavitación, y en consecuencia, reducir el rendimiento de la hélice.



Vida útil de los ánodos:

Es aconsejable cambiar los ánodos de zinc cuando individualmente éstos hubieran perdido cerca de un 50% de su material. En la mayoría de los casos, este porcentaje de deterioro se “pierde” una vez al año en el global del material total de protección. Es decir, una vez al año se pierde el 50% del material que compone a todos los ánodos de sacrificio en conjunto, pero algunos pueden haber perdido mucho más material que otros y deberían de ser reemplazados.

Esto hace que se aconseje revisar los ánodos al menos 2 veces al año.

Hay que tener en cuenta que, sobre una situación normal de uso, existen muchas otras variables que pueden afectar al circuito de corriente galvánica y potenciar el desgaste.

Algunas condicionantes que provocan mayor consumo de ánodos:

- Fugas de corriente propias
- Cantidad de horas con motores en marcha
- Cantidad de horas con generadores en marcha
- Cantidad de tiempo conectado a tierra
- Falla en el sistema de descarga eléctrica
- Alto contenido de contaminantes metálicos (residuos) en el agua
- Alta salinidad del agua
- Fugas eléctricas de barcos cercanos
- Masas metálicas sumergidas sin protección
- Proximidad de barcos con cascos metálicos

Todas estas condicionantes alteran la vida útil de los ánodos de sacrificio.



Calculo del peso del ánodo:

Para el cálculo del peso de los ánodos de sacrificio necesitamos la superficie mojada del barco, en este caso, la voy a calcular con la siguiente formula:

$$Sup. mojada = (1,8 \cdot Lpp \cdot T) + (Lpp \cdot Coeficiente\ del\ bloque \cdot Manga)$$

Lpp	142m
T	6,15m
B	19,06m

Los valores del coeficiente del bloque, normalmente se obtienen de tablas como la siguiente:

Tipo de barco	Coeficiente del bloque
Pasaje	0,6
Carguero	0,75
Arrastre	0,55
Costeros	0,75
Yates	0,4-0,5
Petroleros	0,8-0,9
Romolacadores	0,6
Guerra	0,55
Dragas	0,8
Lanchas	0,4

Coeficientes de bloque para los diferentes barcos.

En nuestro caso, disponíamos del valor:

CB: 0,507



Por lo tanto, la superficie mojada obtenida es:

$$Sm = (1,8 \cdot 142 \cdot 6,15) + (142 \cdot 0,507 \cdot 19,06) = 2944,15m^2$$

Ahora necesitamos conocer la corriente requerida para proteger el casco, se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Corriente (amperios)} = (Sm(m^2) \cdot \text{Den. de corriente}(mA/m^2)) / 1000$$

Las densidades de corriente se tabulan en función de si el buque es de nueva construcción o lleva algún tiempo en servicio, como se muestra en la siguiente tabla:

	Nueva construcción	En servicio
	mA/m²	mA/m²
Oceánicos	10	15
Otros oceánicos	12	15
Costeros	14	20
Ferries	14	20
Arrastreros	22	24
Remolcadores nozzles	22	24
Dragas	24	27
Rompe hielos	25	30
Remolcadores	18	22

Densidad de corriente requerida para los diferentes barcos

A partir de los valores de la tabla, para nuestro caso de estudio, obtenemos un valor de densidad de corriente:

Densidad de corriente: 12mA/m²



Por lo tanto, la corriente requerida para la protección del casco es:

$$Corriente = \frac{2944,15 \cdot 12}{1000} = 35,33 \text{ A}$$

El peso total de los ánodos, será por lo tanto:

$$Peso(Kg) = (Corriente(A) \cdot Vida \text{ útil}(horas)) / Capacidad \text{ del material}(amp.hrs/Kg)$$

Corriente: 43,22 A

Vida útil: 1 año = 8760 horas, suponiendo vida útil de un año.

Capacidad del material: 780 amp.hrs/kg , usando ánodos de zinc

El peso total será:

$$Peso = \frac{35,33 \cdot 8760}{780} = 396,78 \text{ Kg}$$



Selección de los ánodos:



He seleccionado ánodos tipo pez con pletinas, fabricados en zinc, detallado en los apéndices.

Las principales características de los ánodos son las siguientes:

Peso	2,5Kg
Longitud ánodo	200mm
Ancho ánodo	66mm
Longitud total	320mm

El número total de ánodos, por lo tanto será:

$$\frac{396,78}{2,5} = 158,71 \approx 159 \text{ ánodos}$$



Calculo del coste:

Precio ánodo	29,18 €
Mano de obra	15 €/hora

Precio total: 29,18 • 159 = 4639,62€

Se tarda en instalar cada ánodo alrededor de 20 minutos, por lo tanto el precio total sería:

$$\frac{15}{3} = 5 \text{ €/ánodo}$$

Precio mano obra: 159 • 5 = 795€

Precio final ánodos y mano de obra: 4639,62 + 795 = 5434,62 €

Debemos tener en cuenta, que el barco ha de ser pintado previamente, por lo tanto habría que sumar el precio de la pintura. En este caso, se pintaría el barco entero suponiendo como obra muerta, el tipo de pinturas, las capas, procedimiento y precios serán los mismos que fueron detallados en el coste de las pinturas:

$St = 6009,5m^2$

Producto	Color	Micras secas	Solidos (%)	Margen de perdidas		
				0%	10%	30%
17633	12170	125	69	1088,67	1197,54	1415,28
45182	25150	50	46	653,206	718,52	849,16
52140	10000	40	46	522,565	574,82	679,33



Hacemos el mismo proceso que para el caso de las pinturas para obtener los costes de las pinturas usando los mismos precios y suponiendo también que ha sido pintado en taller:

$$1197,54 \cdot 6,5 + 718,52 \cdot 7 + 574,82 \cdot 5 = 15678,84\text{€}$$

También hemos de tener en cuenta que son necesarias las correspondientes capas de antifouling en la obra viva. En este caso, el coste de las pinturas antifouling será el mismo que en el método de las pinturas:

$$2 \cdot (18 \cdot 523,16) = 18833,76 \text{ €}$$

El tiempo estimado en pintar el barco, en este caso será de 100 horas, por lo tanto nos da un valor aproximado de pintura de:

$$15 \cdot 100 + 15687,84 + 18833,76 = 36012,6 \text{ €}$$

El intervalo de diqueado, será de cinco años, por lo tanto:

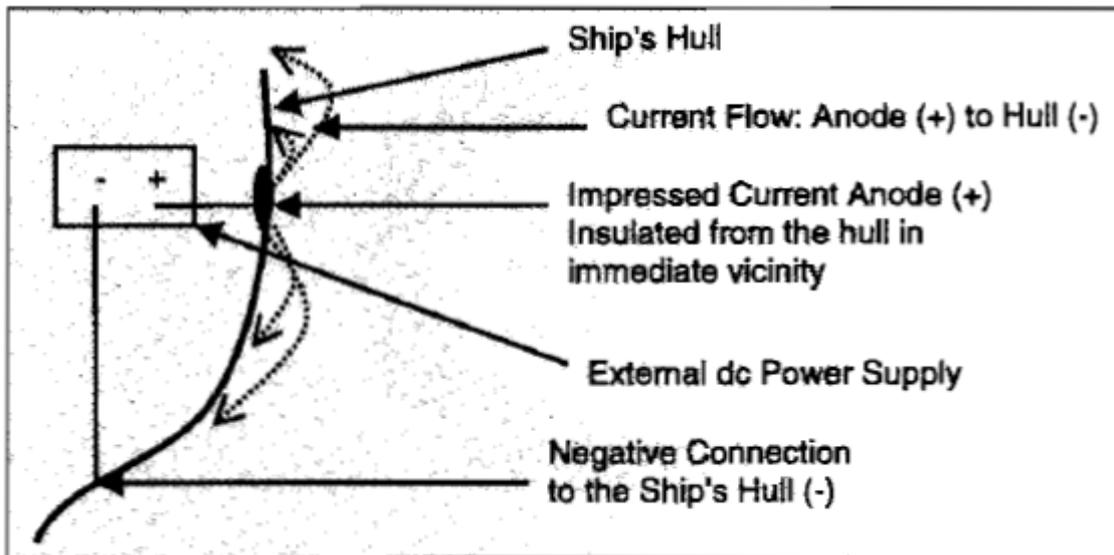
$$\frac{36012,6}{5} = 7202,52 \text{ €}$$

El coste anual, mediante ánodos de sacrificio será el precio de la pintura más el precio de los ánodos:

$$5434,62 + 7202,52 = 12637,14 \text{ €/año}$$



5.4. Corrientes impresas.



A continuación voy a ofrecer los parámetros fundamentales para la elección del sistema de corrientes impresas, la cuál será seleccionada a partir de dos datos fundamentales, el área y la densidad de corriente que se dará al casco dependiendo del material que vaya a proteger.

Sm	2944,15m ²
Eslora	142 m
Calado	6,15m
Manga del buque	19,6m

Densidad de corriente del casco: 0,035 Amperios por metro cuadrado.

$$\text{Corriente requerida} = Sm \cdot \text{Densidad de corriente del casco}$$

Se obtiene:

$$\text{Corriente requerida} = 2944,15 \cdot 0,035 = 103,05A$$



Le aplicaremos un margen de seguridad del 45%:

$$103,05 \cdot 1,45 \approx 150A$$

Será la corriente necesaria a suministrar por el equipo de corriente impresa.

El sistema a instalar tendrá unos 150 amperios totales, el cual se compondrá por los siguientes elementos:

- Una unidad de control de potencia: pueden llegar a utilizarse con sistemas de hasta 800 amperios, como sucede en grandes buques, y suelen estar dispuestos con pantallas de visualización digitales, estos paneles también hacen la función de enviar la información de lo que sucede en el sistema de corrientes impresas a los diferentes ordenadores del buque. Pueden instalarse fácilmente en cámara de máquinas
- Dos ánodos dispersores de la corriente: Su función no es otra que ser quién dispersar la corriente, hoy se han desarrollado tecnologías mediante las cuales previa desconexión del sistema ICCP se pueden cambiar los ánodos por un buzo sin necesidad de hacer varada, los hay de formas muy diversas pero podemos mencionar estas cuatro como las más representativas:
 - 1º. Ánodos circulares; ideales sobre todo para buques con pocas formas, ya que requiere perfil del casco muy liso. La superficie de emisión de corriente se realiza con revestimiento de platino con soporte de titanio.
 - 2º. Ánodos lineales; Son ánodos algo más pesados, pero proporcionan distribución de la corriente bastante buena.



3°. Ánodos elípticos; mejora la distribución de la corriente sobre el casco y proporciona más flexibilidad que los ánodos circulares a la hora de adaptarse a las superficies complejas de un casco. Al igual que los ánodos circulares dichos ánodos no producen resistencia a la marcha significativa.

4°. Ánodos en circuito lineal; poseedores de una corriente elevada en relación con su superficie, dichos ánodos realizan la función de proteger grandes buques con un número inferior de ánodos. Pesan muy poco y se adaptan con facilidad a las formas del buque.

- Dos electrodos de referencia: esenciales para medir el potencial eléctrico en la interfase agua de mar/casco, lo cual permite al sistema variar la corriente entregada a los ánodos. Estos elementos están hechos con plata o cinc, los electrodos de referencia se montan generalmente en nichos entrantes en el casco al igual que los ánodos dispersores.
- Pasta dieléctrica para aplicar en los alrededores de los ánodos dispersores.

Este último punto puede parecer poco importante, pero es parte integrante del sistema y sin él el sistema no funcionaría como es debido. La pasta dieléctrica en los alrededores de los ánodos es debido a que la intensidad de corriente que emana puede causar desperfectos en los materiales e incluso en las pinturas en el caso que la intensidad rebase ciertos límites.

A cada banda se montará un ánodo dispersor de corriente para un reparto eficiente de la misma así que se montarán a cada banda un ánodo que suministrará 75 amperios, completando así el total de 150 amperios para la superficie mojada. También existirán dos electrodos de referencia que tomaran lecturas de la densidad de corriente del casco, uno en babor y otro en estribor los cuales tomarán lecturas



constantes del potencial en el casco.

Con la corriente alterna existente a bordo, se alimenta a un equipo transformadorrectificador, que nos da una corriente continua de salida que se dispersa a través del electrolito y retornando al casco, cerrando así el circuito de protección. Es el equipo transformador-rectificador el que suministra a los ánodos de forma preseleccionada la intensidad de corriente requerida.

Estos equipos normalmente tienen incorporados un sistema de control que mide constantemente el potencial del casco, comparando con el óptimo que hemos seleccionado para así efectuar una regulación efectiva de la corriente de salida de los ánodos.

No hay necesidad de montar ánodos de sacrificio en las zonas de turbulencias como proa y sobre todo popa, cerca de la hélice, debido a que si los ponemos en esa zona no sería efectivo el sistema de corrientes impresas hasta que esos ánodos perdieran su capacidad de proteger, con lo cual redundaríamos sistemas y aumentaríamos costos.

Los ánodos irán situados en la mitad de la eslora, a cada banda, lo que nos da una longitud de cables igual a:

$$71 \cdot 2 + 8 \cdot 2 = 158 m$$

Con un margen de 20%:

$$158 \cdot 1,2 \approx 190 m$$



Calculo del coste:

Unidad control de potencia	6.000 €
Ánodo dispensor de corriente	4.500 €
Electrodo de referencia	1.000 €
Pasta dieléctrica	500 €
Metro de cable	10 €

Coste total:

$$1 \cdot 6000 + 2 \cdot 4500 + 2 \cdot 1000 + 500 + 190 \cdot 10 = 19400€$$

El sistema de corriente impresa puede llegar a tener una vida útil de hasta 20 años, en este caso hemos supuesto para una vida de 10 años, lo que nos da un coste anual de:

$$\frac{19400}{10} = 1940 \text{ €/año}$$

En este caso, el distribuidor nos dio los precios aproximados incluyendo la mano de obra.

Al precio antes descrito, habría que sumarle, al igual que los ánodos de sacrificio, el coste de la pintura, lo cual nos da un precio total de:

$$1940 + 7202,52 = 9142,52 \text{ €/año}$$



Capítulo 6º: Conclusiones finales.

En el presente proyecto hemos escrito los métodos de protección contra la corrosión mediante pinturas antioxidantes, ánodos de sacrificio y corrientes impresas de una fragata de 142m de eslora, con una superficie de obra vida de 2972,5m² y de obra muerta de 3037,4m².

Hemos llevado acabo la selección de los tres tipos de pinturas utilizados para la protección de la obra vida, entre los ofertados por la casa HEMPEL, así como el orden de pintado y la cantidad de pintura requerida. También hemos realizado el mismo estudio para la obra muerta. Con los datos propuestos, el coste anual de la protección mediante pinturas es de 7690,05 €

Para la protección anódica hemos propuesto 159 ánodos de zinc de peso 2,5Kg. Considerando el precio de la mano de obra de la instalación de dichos ánodos y el precio de la pintura que completa la protección el coste anual estimado es de 12637,14 €

El tercer método de protección propuesto es el método de corrientes impresas. Se requiere una unidad de control de potencia, dos ánodos dispersores de corriente, dos electrodos de referencia, pasta dieléctrica y el cableado. Como en el método de protección mediante ánodos de sacrificio, también es necesario la pintura del casco lo cual implica un costo anual de 9142,52 €

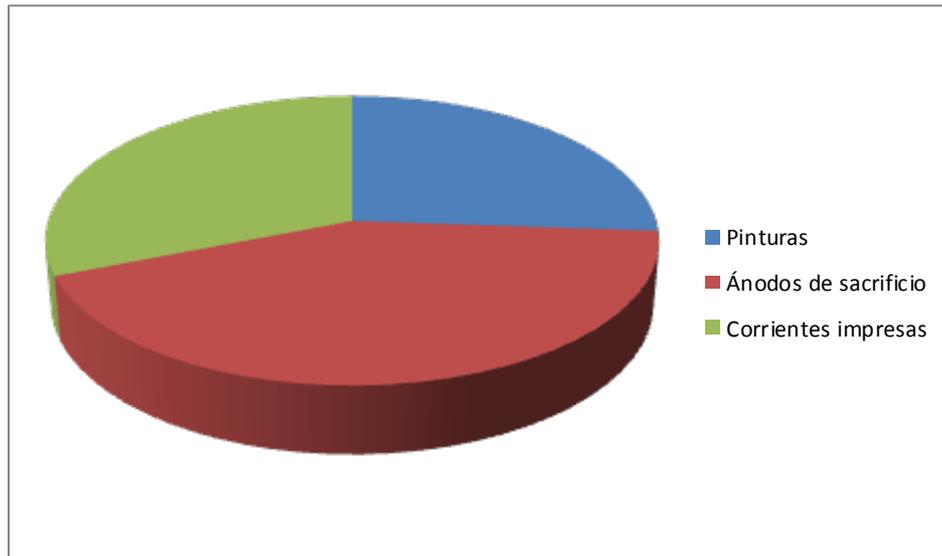


Gráfico comparativo de los costes anuales en los diferentes métodos.

Comparando los tres métodos de protección, la inversión inicial más elevada corresponde al método de corrientes impresas. Si consideramos el coste anualmente, como se puede apreciar en el gráfico, el método más económico es el método de las pinturas, pero seguido con un margen de diferencia muy pequeño de las corrientes impresas.

Aparte del menor coste ponderado anualmente, también hay que tener en cuenta el intervalo de diqueado, que en el caso de corriente impresa, al igual que en caso de las pinturas será de 5 años, lo cual en el caso de un buque mercante, supondría un ahorro por parte del armador al tener un intervalo mayor de diqueado, en detrimento del sistema de ánodos de sacrificio que, en el caso de estudio, supusimos anualmente.



Capítulo 7º: Anexos.

7.1. Barco de estudio.

Fragata US Navy Combatant, DTMB 5415:

US Navy Combatant, DTMB 5415

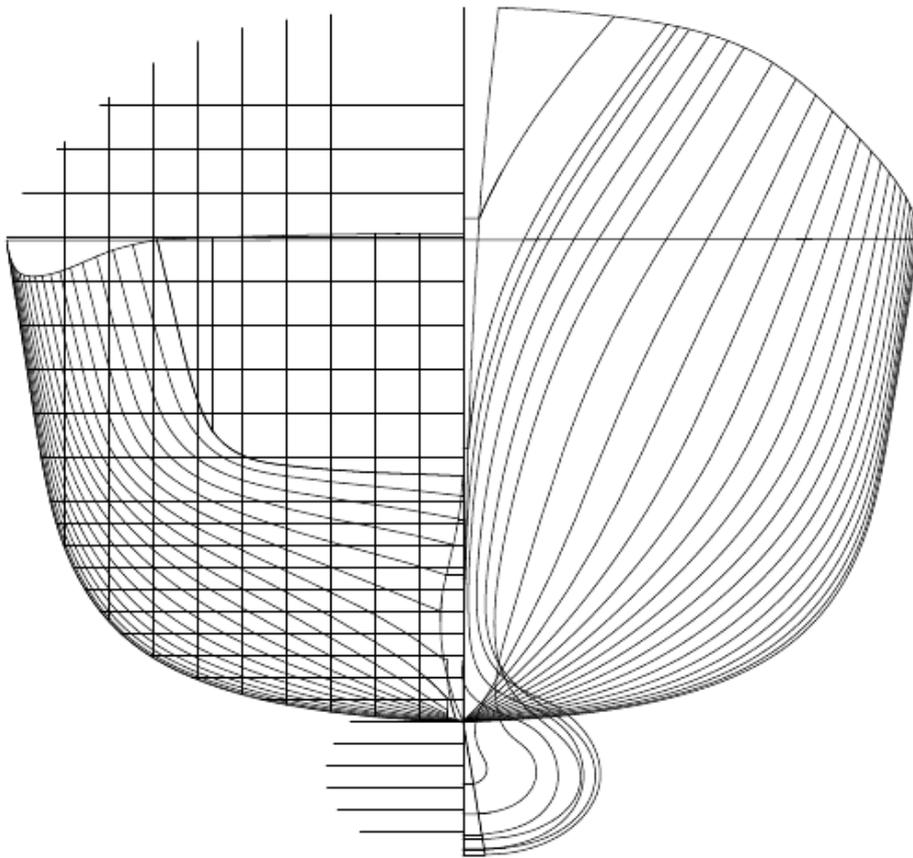


<i>CARACTERÍSTICAS COMTATANT 5415</i>	
Lpp (m)	142.00
Lwl (m)	142.18
Bwl (m)	19.06
T (m)	6.15
Displacement (m³)	8424.4
S w/o rudder (m²)	2972.6
CB	0.507
CM	0.821
LCB (%Lpp),fwd+	-0.683
Rudders	
Type	Spade
S of rudder, each (m²)	30.8
Lat. area, each (m²)	15.4



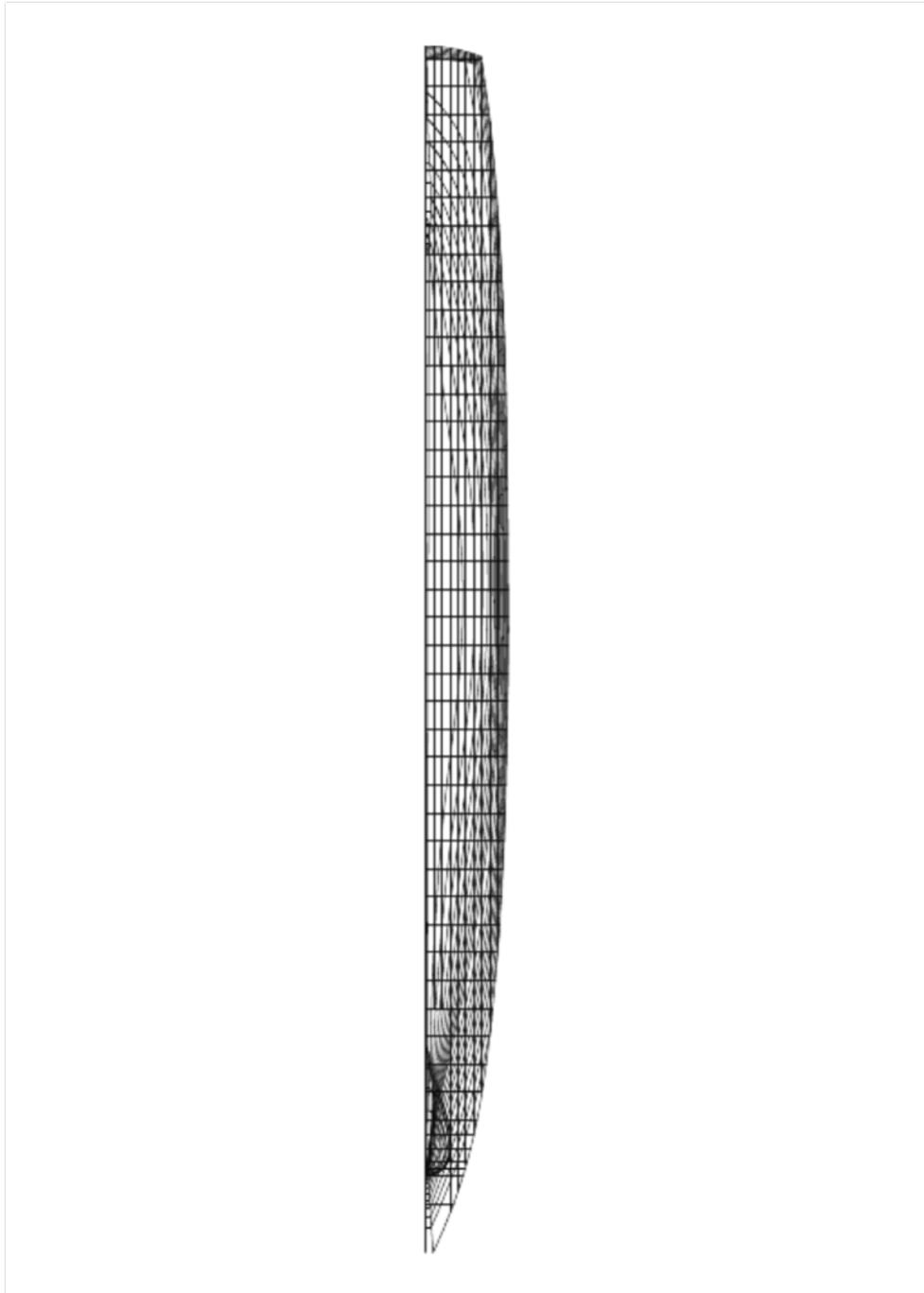
7.2. Planos de formas.

7.2.1 Vista transversal.



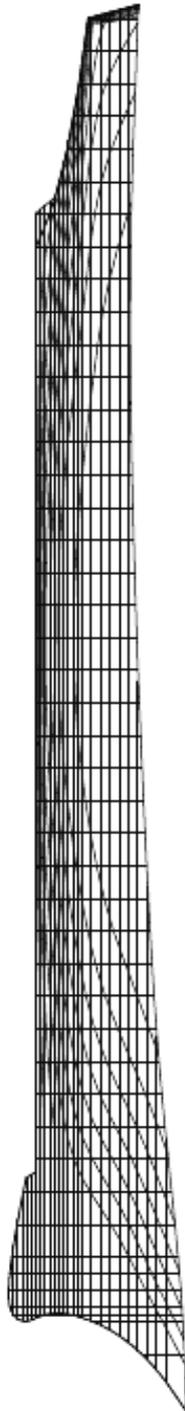


7.2.2. Vista en planta.



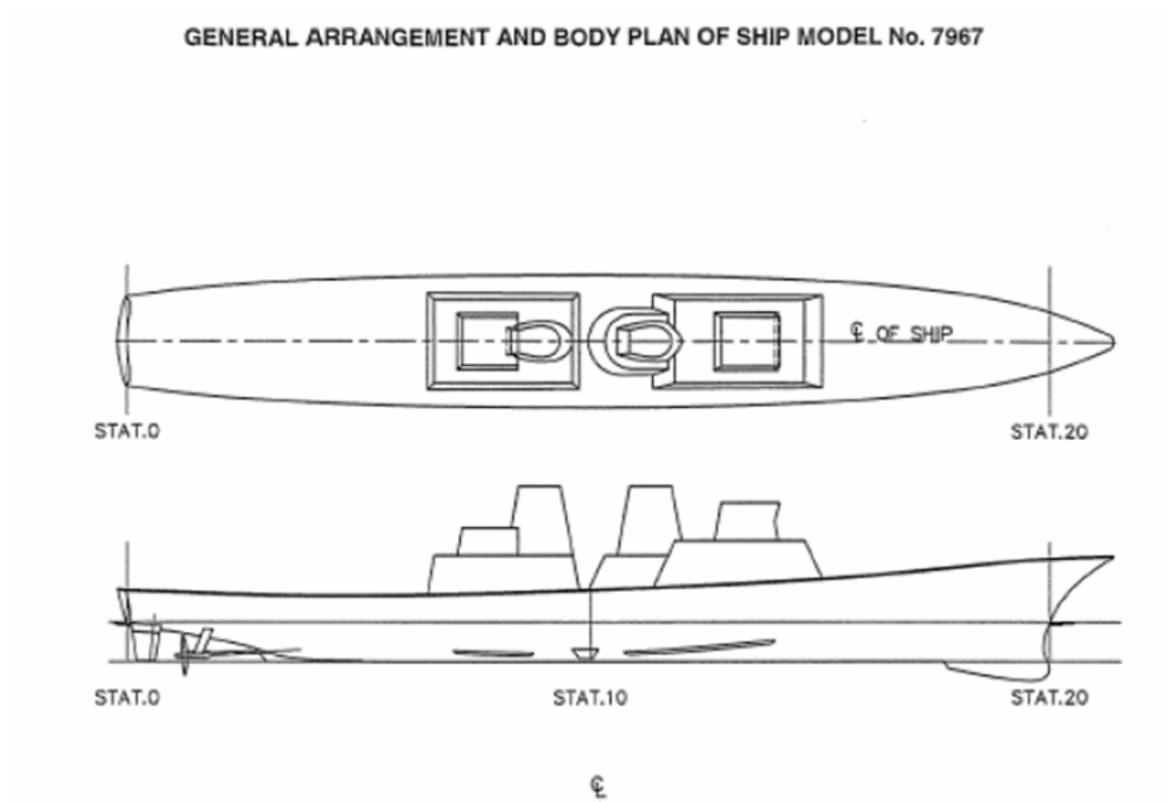


7.2.3. Vista longitudinal.





7.2.4. Disposición general.





7.3. Pinturas.



Product Data

HEMPADUR® 17630/ HEMPADUR® 17633

17630: BASE 17639 with CURING AGENT 97330
17633: BASE 17639 with CURING AGENT 98420

Description:	HEMPADUR 17630/17633 is a two-component, high-build, polyamide adduct-cured epoxy paint which cures to a hard and tough coating with good resistance to abrasion, seawater and crude oils.	
Recommended use:	As a selfprimed coating for ballast water tanks and similar. As a primer for epoxy systems for atmospheric or in-water service, eg ship hulls. Suitable for application down to -10°C/ 15°F. HEMPADUR 17633 is intended for use in cold/temperate climates, HEMPADUR 17630 is intended for use in temperate to warm climates.	
Service temperatures:	Dry exposure only: Maximum 120°C/248°F (See REMARKS overleaf) Ballast water service: Resists normal ambient temperatures at sea* Other water service: 40°C/104°F (no temperature gradient) Other liquids: Contact HEMPEL *Avoid long-term exposure to negative temperature gradients.	
Certificates/Approvals:	Classification B1 by Marintek, Norway. Approved by Lloyd's Register of Shipping as a provisionally recognized corrosion control coating. Approved as a corrosion control coating by Maritime Register of Shipping, Russia. Approved as a ballast tank coating by Germanischer Lloyd, Germany. HEMPADUR 17630 has been tested for non-contamination of grain cargo at the Newcastle Occupational Health, Great Britain. HEMPADUR 17630 complies with Section 175.300 of the Code of Federal Regulations in respect of carriage of dry foodstuffs (FDA) in spaces with an internal surface area larger than 1000 m ² /10.750 sq.ft.	
Availability:	Part of Group Assortment. Local availability subject to confirmation.	
PHYSICAL CONSTANTS:	17630	17633
Version; mixed product:	Grey/12170 - Red/50630	Grey/12170 - Red/50630
Colours/Shade nos:		
Finish:	Semi-flat	Semi-flat
Volume solids, %:	69 ± 1	69 ± 1
Theoretical spreading rate:	4.6 m ² /litre - 150 micron 184 sq.ft./5 gallon - 6 mils 32°C/90°F	4.6 m ² /litre - 150 micron 184 sq.ft./5 gallon - 6 mils 32°C/90°F
Flash point:	1.4 kg/litre - 11.7 lbs/US gallon	1.4 kg/litre - 11.7 lbs/US gallon
Specific gravity:	7-8 hours at 20°C/68°F	16 hours (app.) at 5°C/41°F
Dry to touch:	7 days at 20°C/68°F	20 days at 5°C/41°F
Fully cured:	310 g/litre - 2.6 lbs/US gallon	305 g/litre - 2.5 lbs/US gallon
V.O.C.:		
<small>The physical constants stated are nominal data according to the HEMPEL Group's approved formulas. They are subject to normal manufacturing tolerances and where stated, being standard deviation according to ISO 3534-1.</small>		
APPLICATION DETAILS:	17630	17633
Mixing ratio:	Base 17639 : Curing agent 97330 4 : 1 parts by volume	Base 17639 : Curing agent 98420 4 : 1 parts by volume
Application method:	Airless spray Brush	Airless spray Brush
Thinner (max.vol.):	08450 (5%) 08450 (5%)	08450 (5%) 08450 (5%)
Pot life:	2 hours (20°C/68°F)	2 hours (20°C/68°F)
Induction time:	See REMARKS overleaf	
Nozzle orifice:	.021"-.025"	
Nozzle pressure:	250 bar/3600 psi (Airless spray data are indicative and subject to adjustment)	
Cleaning of tools:	HEMPEL'S TOOL CLEANER 99610	
Indicated film thickness, dry:	150 micron/6 mils	
Indicated film thickness, wet:	225 micron/9 mils	
Recoat interval, min:	8 hours (20°C/68°F)	
Recoat interval, max:	See separate APPLICATION INSTRUCTIONS	
Safety:	Handle with care. Before and during use, observe all safety labels on packaging and paint containers, consult HEMPEL Material Safety Data Sheets and follow all local or national safety regulations. Avoid inhalation, avoid contact with skin and eyes, and do not swallow. Take precautions against possible risks of fire or explosions as well as protection of the environment. Apply only in well ventilated areas.	

HEMPEL
Product Data Sheet



HEMPADUR 17630/17633

SURFACE PREPARATION:	<p>New steel: Remove oil and grease, etc. with suitable detergent. Remove salt and other contaminants by (high pressure) fresh water cleaning. Abrasive blasting to Sa 2½. For temporary protection, if required, use a suitable shopprimer. All damage of shopprimer and contamination from storage and fabrication should be thoroughly cleaned prior to final painting. For repair and touch up, use HEMPADUR 17630.</p> <p>Repair and maintenance: Remove oil and grease, etc. with suitable detergent. Remove salt and other contaminants by (high pressure) fresh water cleaning. Clean damaged areas thoroughly by power tool cleaning to St 3 (minor areas) or by abrasive blasting to min. Sa 2, preferably to Sa 2½. Improved surface preparation will improve the performance of HEMPADUR 17630/17633. As an alternative to dry cleaning, water jetting to sound, well adhering coat and/or to steel. Intact coat must appear with roughened surface after the water jetting. By water jetting to steel, cleanliness shall be WJ-3 to WJ-2 (atmospheric exposure) / minimum WJ-2 (immersion) (NACE No. 5/SSPC-SP 12). A flash-rust degree of maximum FR-2 (atmospheric exposure) / FR-2, preferably FR-1 (immersion) (Hempel standard) is acceptable before application. Feather edges to sound and intact paint. Dust off residues. Touch up to full film thickness.</p> <p>On pit-corroded surfaces, excessive amounts of salt residues may call for water jetting or wet abrasive blasting, alternatively dry abrasive blasting followed by high pressure fresh water hosing, drying, and finally, dry abrasive blasting again.</p>
APPLICATION CONDITIONS:	<p>Use only where application and curing can proceed at temperatures above -10°C/14°F (curing agent 98420) and 0°C/32°F (curing agent 97330). The temperature of the paint itself should be above 15°C/59°F for proper application. Apply only on a dry and clean surface with a temperature above the dew point to avoid condensation.</p> <p>In confined spaces provide adequate ventilation during application and drying.</p>
SUBSEQUENT COAT:	<p>None or according to specification.</p>
REMARKS:	<p>Certificates are issued under the former quality number 1763.</p>
Weathering/ service temperatures:	<p>The natural tendency of epoxy coatings to chalk in outdoor exposure and to become more sensitive to mechanical damage and chemical exposure at elevated temperatures is also reflected in this product.</p>
Film thicknesses:	<p>May be specified in another film thickness than indicated depending on purpose and area of use. This will alter spreading rate and may influence drying time and recoating interval. Normal range dry is 125-200 micron/5-8 mils.</p>
Curing agent:	<p>Curing agent 98420 is unclear. This is intended and has no negative influence on the performance.</p>
Mixing/ induction time:	<p>To facilitate proper application properties it is recommended to allow the thoroughly mixed BASE and CURING AGENT to prereact before application. In case two-component spray-equipment is used, paint material is to be heated. Consult separate APPLICATION INSTRUCTIONS.</p>
Note:	<p>HEMPADUR 17630/17633 is for professional use only.</p>
ISSUED BY:	<p>HEMPEL A/S - 1763012170C0005 / 1763312170C0002</p>

*This Product Data Sheet supersedes those previously issued.
For explanations, definitions and scope, see "Explanatory Notes" in the HEMPEL Book.
Data, specifications, directions and recommendations given in this data sheet represent only test results or experience obtained under controlled or specially defined circumstances. Their accuracy, completeness or appropriateness under the actual conditions of any intended use of the Products herein must be determined exclusively by the Buyer and/or User.
The Products are supplied and all technical assistance is given subject to HEMPEL's GENERAL CONDITIONS OF SALES, DELIVERY AND SERVICE, unless otherwise expressly agreed in writing. The Manufacturer and Seller disclaim, and Buyer and/or User waive all claims involving, any liability, including but not limited to negligence, except as expressed in said GENERAL CONDITIONS for all results, injury or direct or consequential losses or damages arising from the use of the Products as recommended above, on the overleaf or otherwise.
Product data are subject to change without notice and become void five years from the date of issue.*



Product Data

HEMPADUR® 45182

CURING AGENT 98180

Description:	HEMPADUR 45182 is a two-component, low-temperature curing, modified polyamide adduct cured epoxy.
Recommended use:	For marine and protective use as a "tie coat" between epoxy and physically drying coatings. For marine use also as a "sealer" of old antifouling.
Service temperatures:	Maximum, dry exposure only: 80°C/176°F
Availability:	Part of Group Assortment. Local availability subject to confirmation.
PHYSICAL CONSTANTS:	
Colours/Shade nos.:	Yellowish grey/25150
Finish:	Flat
Volume solids, %:	46 ± 1
Theoretical spreading rate:	4.6 m ² /litre - 100 micron 184 sq.ft./US gallon - 4 mils
Flash point:	23°C/73°F
Specific gravity:	1.3 kg/litre - 10.8 lbs/US gallon
Dry to touch:	6 (approx.) hours at 20°C/68°F
Fully cured:	7 days at 20°C/68°F
V.O.C.:	490 g/litre - 4.1 lbs/US gallon

The physical constants stated are nominal data according to the HEMPEL Group's approved formulas. They are subject to normal manufacturing tolerances and where stated, being standard deviation according to ISO 3534-1.

APPLICATION DETAILS:

Mixing ratio for 45182:	Base 45187 : Curing agent 98180 4 : 1 by volume
Application method:	Airless spray Brush (touch up)
Thinner (max.vol.):	08450 (5%) 08450 (5%)
Pot life:	3 hours (20°C/68°F)
Nozzle orifice:	.023"
Nozzle pressure:	200 bar/2900 psi <i>(Airless spray data are indicative and subejct to adjustment)</i>
Cleaning of tools:	HEMPEL'S TOOL CLEANER 99610
Indicated film thickness, dry:	100 micron/4 mils <i>(see REMARKS overleaf)</i>
Indicated film thickness, wet:	225 micron/9 mils
Recoat interval, min:	6 hours (20°C/68°F)
Recoat interval, max:	Antifouling: 5 days (20°C/68°F) Other topcoats, for areas above water: according to separate painting specification.

Safety:	Handle with care. Before and during use, observe all safety labels on packaging and paint containers, consult HEMPEL Material Safety Data Sheets and follow all local or national safety regulations. Avoid inhalation, avoid contact with skin and eyes, and do not swallow. Take precautions against possible risks of fire or explosions as well as protection of the environment. Apply only in well ventilated areas.
----------------	--



HEMPADUR 45182

SURFACE PREPARATION:	New steel: Abrasive blasting to Sa 2½. For temporary protection if required use suitable shopprimer. Any damage of shopprimer and contamination from storage and fabrication should be thoroughly cleaned prior to final painting. For priming purposes, specified HEMPADUR paint. Maintenance: Remove oil and grease, etc. with suitable detergent. Remove salt and other contaminants by (high pressure) fresh water cleaning. When used as "tie coat": remove all rust and other loose material by abrasive blasting or powertool cleaning. Feather edges to sound and intact areas. Dust off residues. Touch up to full film thickness with specified HEMPADUR paint (see REMARKS below). When used as "sealer" on old antifouling: a very careful high pressure freshwater cleaning -or jetting, if needed - to remove possible leached layer of antifouling and make sure that old layers of weak intercoat adhesion ("sandwich structure") really are removed.
APPLICATION CONDITIONS:	Use only where application and curing can proceed at temperatures higher than -10°C/14°F. The temperature of the surface and that of the paint itself must also be above this limit. Apply only on a dry and clean surface with a temperature above the dew point to avoid condensation. In confined spaces such as sea chest or stagnant air under large flat bottoms provide adequate ventilation during application and drying.
PRECEDING COAT:	HEMPADUR systems according to specification. In case of an old antifouling system this must be well cleaned and in good condition.
SUBSEQUENT COAT:	Antifouling or other physically drying solvent based paints according to specification.
REMARKS:	
Film thicknesses:	May be specified in another film thickness than indicated depending on purpose and area of use. This will alter spreading rate and may influence drying time and recoating interval. Normal range dry is 75-125 micron/3-5 mils. As "sealer" typically to be specified in 50 -75 micron/2-3 mils dry film thickness. Thinning may be required to facilitate proper film formation.
Film thicknesses, subsequent coats:	HEMPADUR 45182 is designed for recoating with antifouling in any normal specified total film thicknesses. HEMPADUR 45182 is not designed for recoating with heavy duty epoxy systems. Later maintenance of paint systems with HEMPADUR 45182 as a part of the system is accordingly most conveniently carried out by touch-up with a "mastic" type epoxy and with a proper overlap of intact surrounding paint system.
Recoating:	A completely clean surface is mandatory to ensure intercoat adhesion, especially in the case of long recoating intervals. Any dirt, oil and grease have to be removed with eg suitable detergent followed by high pressure fresh water cleaning. Salts to be removed by fresh water hosing. Any degraded surface layer, as a result of a long exposure period, must be removed as well . Water jetting may be relevant to remove any degraded surface layer and may also replace the above-mentioned cleaning methods when properly executed. To check whether the quality of the surface cleaning is adequate, a test patch may be relevant. A thin extra coat of HEMPADUR 45182 may advantageously be applied if there is any doubt about suitability of cleaning process.
Note:	HEMPADUR 45182 is for professional use only.
ISSUED BY:	HEMPEL A/S - 4518225150CR001

*This Product Data Sheet supersedes those previously issued.
For explanations, definitions and scope, see "Explanatory Notes" in the HEMPEL Book.
Data, specifications, directions and recommendations given in this data sheet represent only test results or experience obtained under controlled or specially defined circumstances. Their accuracy, completeness or appropriateness under the actual conditions of any intended use of the Products herein must be determined exclusively by the Buyer and/or User.
The Products are supplied and all technical assistance is given subject to HEMPEL's GENERAL CONDITIONS OF SALES, DELIVERY AND SERVICE, unless otherwise expressly agreed in writing. The Manufacturer and Seller disclaim, and Buyer and/or User waive all claims involving, any liability, including but not limited to negligence, except as expressed in said GENERAL CONDITIONS for all results, injury or direct or consequential losses or damages arising from the use of the Products as recommended above, on the overleaf or otherwise.
Product data are subject to change without notice and become void five years from the date of issue.*



Product Data

HEMPEL'S ANTIFOULING OLYMPIC® 86950

TIN-FREE

Description:	HEMPEL'S ANTIFOULING OLYMPIC 86950 is a high solids, tin-free, self-polishing antifouling. Polishing is based on an ion exchange, resulting in a hydrolysable activated layer. An inorganic fibre content ensures polishing control and mechanical strength. This product does not contain organotin compounds acting as biocides and complies with the International Convention on the Control of Harmful Antifouling Systems on Ships as adopted by IMO October 2001 (IMO document AFS/CONF/26).
Recommended use:	As an economical antifouling for bottom and boottop on deep-sea operating vessels operating at medium to high speed and high activity with short idle periods, and with drydocking interval of up to 36 months. Aluminium hulls: see REMARKS overleaf.
Availability:	Part of Group Assortment. Local availability subject to confirmation.
PHYSICAL CONSTANTS:	
Colours/Shade nos:	Red/51110 - Brown/60700 (see REMARKS overleaf)
Finish:	Flat
Volume solids, %:	52 ± 1
Theoretical spreading rate:	5.2 m ² /litre - 100 micron 209 sq.ft./US gallon - 4 mils
Flash point:	27°C/81°F
Specific gravity:	1.7 kg/litre - 14.1 lbs/US gallon
Dry to touch:	4-5 hours at 20°C/68°F
V.O.C.:	425 g/litre - 3.5 lbs/US gallon
	<small>The physical constants stated are nominal data according to the HEMPEL Group's approved formulas. They are subject to normal manufacturing tolerances and where stated, being standard deviation according to ISO 3534-1.</small>
APPLICATION DETAILS:	
Application method:	Airless spray (see REMARKS overleaf) Brush/Roller (see REMARKS overleaf)
Thinner (max. vol.):	08080 (5%) 08080 (5%)
Nozzle orifice:	.027"-.031"
Nozzle pressure:	270 bar/4000 psi (Airless spray data are indicative and subject to adjustment)
Cleaning of tools:	HEMPEL'S THINNER 08080
Indicated film thickness, dry:	100 micron/4 mils (see REMARKS overleaf)
Indicated film thickness, wet:	200 micron/8 mils
Recoat interval, min:	8 hours (20°C/68°F)
Recoat interval, max:	See REMARKS overleaf
Safety:	Handle with care. Before and during use, observe all safety labels on packaging and paint containers, consult HEMPEL Material Safety Data Sheets and follow all local or national safety regulations. Avoid inhalation, avoid contact with skin and eyes, and do not swallow. Take precautions against possible risks of fire or explosions as well as protection of the environment. Apply only in well ventilated areas.



HEMPEL'S ANTIFOULING OLYMPIC 86950

SURFACE PREPARATION:	Existing organotin copolymer based selfpolishing antifouling: Remove possible oil and grease etc. with suitable detergent, followed by careful high pressure fresh water cleaning. Ensure that any possible leached surface layer is removed effectively. Allow the surface to dry before recoating.
	Sealer: Whether to use a sealer coat or not depends on the type and condition of the existing antifouling.
APPLICATION CONDITIONS:	The surface must be completely clean and dry at the time of application and its temperature must be above the dew point to avoid condensation. In confined spaces such as sea chests and stagnant air under large flat bottoms provide adequate ventilation during application and drying.
PRECEDING COAT:	HEMPATEX HI-BUILD 46330, HEMPADUR 451&2 or according to specification.
SUBSEQUENT COAT:	None.
REMARKS:	This product contains heavy particles. Stir well before use. By providing a constantly active surface during its lifetime, this antifouling is gradually sacrificed in the process.
Colour:	ANTIFOULING OLYMPIC is never tinted and as the high load of cuprous oxide influences the shade a certain variation from batch to batch is allowable. Exposure to humid weather shortly after application is likely to cause discolouration. This is a surface phenomenon only and has no influence on performance nor recoatability. The final colour will appear after exposure to saltwater. This has no influence on the antifouling performance. Brown 60700 changes to greyish in direct contact with seawater.
Redocking:	At redocking, HEMPEL'S ANTIFOULING OLYMPIC 86950 can be recoated after thorough cleaning and removal of any poorly adhering surface layer on the antifouling. Reference is made to SURFACE PREPARATION above. If recoated with other types of antifouling, other surface preparation methods may be required - contact HEMPEL.
Aluminium hulls:	May be specified on aluminium hulls provided an efficient anticorrosive system in minimum 2 coats of 150 micron/6 mils each has been applied. The anticorrosive system must stay intact during service in order to avoid corrosion of the aluminium caused by the cuprous oxide content of OLYMPIC.
Application equipment:	Standard airless heavy-duty spray equipment: Pump ratio: min 45:1 (see Note below) Pump output: min 12 litres/minute (theoretical) Spray hoses: max 15 metres/50 feet, 3/8" internal diameter max 3 metres/10 feet, 1/4" internal diameter
	Note: If longer spray hoses are necessary, up to 50 metres/150 feet hose (1/2" internal diameter) can be added. The pump ratio must be raised to 60:1 or more, however, the high output capacity of the pump must be maintained. A reversible nozzle is recommended. Filter: Surge tank filter and tip filter should be removed.
Filmthicknesses:	Range and control of dry film thickness: 80 micron/3.2 mils to 150 micron/6 mils. Indicated film thickness will vary according to specification. This will alter spreading rate and may influence drying time. In case of multi-coat application, drying time and minimum recoat interval will be influenced by the number of coats and by the thickness of each coat applied - reference is made to the corresponding painting specification. Keep thinning to a minimum to ensure that correct film thickness is obtained. The proper way of governing the film thickness is to sub-divide the areas to be painted and calculate the amount of paint to be applied on each sub-divided area. The exact amount of paint calculated must be applied evenly on the area. For further information, please consult the corresponding painting specification.
Recommended number of coats:	As per specification depending on existing hull condition, trading pattern, and intended service life. No maximum recoat interval, but after prolonged exposure to polluted atmosphere, remove accumulated contamination by high pressure fresh water cleaning and allow to dry before applying next coat.
Undocking:	Minimum undocking time depends on number of coats applied, film thickness, the prevailing temperature and the subsequent exposure/service conditions. For further information, please consult the corresponding painting specification. Maximum undocking time depends on the atmospheric conditions (UV radiation, temperature, degree of atmospheric pollution, etc.). Exposure to the atmosphere in up to 6 months normally presents no problems but extraordinary contamination may call for a freshwater high pressure hosing - contact Hempel.
Note:	HEMPEL'S ANTIFOULING OLYMPIC 86950 is for professional use only.
ISSUED BY:	HEMPEL A/S - 8695051110CR001

This Product Data Sheet supersedes those previously issued. For explanations, definitions and scope, see "Explanatory Notes" in the HEMPEL Book. Data, specifications, directions and recommendations given in this data sheet represent only test results or experience obtained under controlled or specially defined circumstances. Their accuracy, completeness or appropriateness under the actual conditions of any intended use of the Products herein must be determined exclusively by the Buyer and/or User. The Products are supplied and all technical assistance is given subject to HEMPEL's GENERAL CONDITIONS OF SALES, DELIVERY AND SERVICE, unless otherwise expressly agreed in writing. The Manufacturer and Seller disclaim, and Buyer and/or User waive all claims involving, any liability, including but not limited to negligence, except as expressed in said GENERAL CONDITIONS for all results, injury or direct or consequential losses or damages arising from the use of the Products as recommended above, on the overleaf or otherwise. Product data are subject to change without notice and become void five years from the date of issue.



Product Data

HEMPALIN® ENAMEL 52140

Description: HEMPALIN ENAMEL 52140 is a glossy alkyd enamel which forms a weather resistant coating. It is flexible and resistant to salt water and spillage of mineral oil and other aliphatic hydrocarbons.

Recommended use: As a general purpose finishing coat in alkyd systems on exterior and interior steel and woodwork in mildly to moderately corrosive environment.
As a finishing coat in engine rooms including tanktops, main engines and auxiliary machinery.

Service temperatures: Maximum, dry exposure only:
120°C/248°F (these temperatures may cause yellowing/discoloration).

Certificates/Approvals: Approved as a low flame spread material by Danish, French, Spanish and Singaporean authorities according to IMO resolution MSC 61 (67).
Has a Danish, French, Spanish, Singaporean and Malaysian EC-type Examination Certificate.
Please see REMARKS overleaf.

Availability: Part of Group Assortment. Local availability subject to confirmation.

PHYSICAL CONSTANTS:

Colours/Shade nos:	White/10000*	Black/19990*
Finish:	Glossy	Glossy
Volume solids, %:	46 ± 1	43 ± 1
Theoretical spreading rate:	15.3 m ² /litre - 30 micron 615 sq.ft./US gallon - 1.2 mils	14.3 m ² /litre - 30 micron 575 sq.ft./US gallon - 1.2 mils
Flash point:	38°C/100°F	38°C/100°F
Specific gravity:	1.1 kg/litre - 9.2 lbs/US gallon	0.9 kg/litre - 7.5 lbs/US gallon
Surface dry:	2½ (approx) hrs at 20°C/68°F (ISO 1517)	2½ (approx) hrs at 20°C/68°F (ISO 1517)
Dry to touch:	6-8 hours at 20°C/68°F	6-8 hours at 20°C/68°F
V.O.C.:	430 g/litre - 3.6 lbs/US gallon	455 g/litre - 3.8 lbs/US gallon

**Other shades according to assortment list.*

The physical constants stated are nominal data according to the HEMPEL Group's approved formulas. They are subject to normal manufacturing tolerances and where stated, being standard deviation according to ISO 3534-1.

APPLICATION DETAILS:

Application method:	Airless spray	Air spray	Brush/Roller	
Thinner (max. vol.):	08230 (5%)	08230 (15%)	08230 (5%)	(See REMARKS overleaf)
Nozzle orifice:	.018"			
Nozzle pressure:	150 bar/2200 psi (Airless spray data are indicative and subject to adjustment)			
Cleaning of tools:	THINNER 08230			
Indicated film thickness, dry:	30 micron/1.2 mils			
Indicated film thickness, wet:	75 micron/3 mils			
Recoat interval, min:	8 hours (20°C/68°F)			
Recoat interval, max:	See REMARKS overleaf			

Safety: Handle with care. Before and during use, observe all safety labels on packaging and paint containers, consult HEMPEL Material Safety Data Sheets and follow all local or national safety regulations. Avoid inhalation, avoid contact with skin and eyes, and do not swallow. Take precautions against possible risks of fire or explosions as well as protection of the environment. Apply only in well ventilated areas.



HEMPALIN ENAMEL 52140

APPLICATION CONDITIONS: As dictated by normal good painting practice.
 In confined spaces provide adequate ventilation during application and drying.

PREDEDING COAT: HEMPALIN PRIMER 12050, HEMPALIN PRIMER HI-BUILD 13200, HEMPALIN UNDERCOAT 42460 according to specification.

SUBSEQUENT COAT: None.

REMARKS: **Certificates** have been issued under the former quality number 5214.
 Colours: Certain lead-free red and yellow colours may discolour when exposed to chlorine- containing atmosphere.
 Leaded colours may become discoloured when exposed to sulphide-containing atmosphere.
 To obtain full opacity, an extra coat may be necessary, especially for certain lead-free colours in eg red, orange, yellow and green.

Film thicknesses: May be specified in other filmthicknesses than indicated depending on purpose and area of use.
 This will alter spreading rate and may influence drying time and recoat interval. Normal range 30-40 micron/1.2-1.6 mils.

Thinning: THINNER 08080 may be used for spray application, however, with a certain risk of wrinkling of the preceding **fresh** coat of HEMPALIN.

Recoating: Recoat intervals related to later conditions of exposure:
 (30 micron/1.2 mils dry film thickness of HEMPALIN ENAMEL 52140)

	Minimum		Maximum	
Surface temperature	20°C/68°F		20°C/68°F	
Recoated with (quality numbers only)	Atmospheric		Atmospheric	
	Mild	Medium	Mild	Medium
52140	8 hours	8 hours	None	5 days

If the maximum recoat interval is exceeded, roughening of the surface is recommended to ensure intercoat adhesion.
 Before recoating after exposure in contaminated environment, clean the surface thoroughly by (high pressure) fresh water hosing and allow to dry.

Note: **HEMPALIN ENAMEL 52140 is for professional use only.**

ISSUED BY: HEMPEL A/S - 5214010000C0017

*This Product Data Sheet supersedes those previously issued.
 For explanations, definitions and scope, see "Explanatory Notes" in the HEMPEL Book.
 Data, specifications, directions and recommendations given in this data sheet represent only test results or experience obtained under controlled or specially defined circumstances. Their accuracy, completeness or appropriateness under the actual conditions of any intended use of the Products herein must be determined exclusively by the Buyer and/or User.
 The Products are supplied and all technical assistance is given subject to HEMPEL's GENERAL CONDITIONS OF SALES, DELIVERY AND SERVICE, unless otherwise expressly agreed in writing. The Manufacturer and Seller disclaim, and Buyer and/or User waive all claims involving, any liability, including but not limited to negligence, except as expressed in said GENERAL CONDITIONS for all results, injury or direct or consequential losses or damages arising from the use of the Products as recommended above, on the overleaf or otherwise.
 Product data are subject to change without notice and become void five years from the date of issue.*



7.4. Ánodo.

G-2-N
G-2-N

Soldar
Weld-on

Datos Técnicos *Technical Data*

Capacidad Capacity	781 Ah/Kg 781 Ah/Kg
Eficiencia Efficiency	95% Teóricamente para zinc puro 95% theoretically for pure zinc
Consumo Consumption	11,2 Kg./Año 11,2 Kg./Year
Tensión de conducción Conduction Tension	0,23 V sobre acero polarizado 0,23 V for polarised steel
Densidad Density	7,13 Kg./dm ³ 7,13 Kg./dm ³
Potencial en circuito cerrado Potential in closed circuit	-1,08 V (vs. electrodo Cu/Cu/SO4) -1,08 V (vs. electrode Cu/Cu/SO4)

Dimensiones *Dimensions*

A	220 mm	A	220 mm
B	66 mm	B	66 mm
C	30 mm	C	30 mm
D	340 mm	D	340 mm
E	4 mm	E	4 mm
F	25 mm	F	25 mm
Peso Neto Aprox. Approx. net weight	2,25 Kg	Peso Bruto Aprox. Approx. gross weight	2,50 Kg

Análisis Químico según la norma US MIL-18001-K
Chemical Analysis according to the standard US MIL-18001-K

Si	0,125 máx
Si	0,125 max
Pb	0,006 máx
Pb	0,006 max
Fe	0,005 máx
Fe	0,005 max
Cd	0,025 - 0,07
Cd	0,025 - 0,07
Cu	0,005 máx
Cu	0,005 max
Al	0,10 - 0,50%
Al	0,10 - 0,50%
Zinc	Resto
Zinc	Rest



Capítulo 8º: Bibliografía.

- Manual técnico HEMPEL
HEMPEL S.A.U, 2008
- Product data manual HEMPEL
HEMPEL S.A.U, 2010
- Revista del Instituto de Investigación FIGMMG
Vol 7, N.º 13, 37-44 (2004) Universidad Nacional Mayor de San Marcos
- Protección catódica.
ARGO. S.A, 2009
- Protección catódica T.F.2
WILSON WALTON, 2004
- Cathodic protection for ships
Craig Botha, Paradigm Projects, 2006
- Protección catódica de un buque Ro Ro de 210 plataformas,
Ismael Diez Ortega, Universidad Politécnica de Cadiz, 2008
- El proyecto básico del buque mercante
Ricardo Alvariño, Colegio Oficial de Ingenieros Navales, 1997
- Corrosión y control de corrosión
Herbert H. Uhlig, Urmo, 1962
- Corrosión y degradación de materiales
Enrique Otero Huerta, Síntesis, 2012
- Apuntes corrosión marina
Ginés Martínez Nicolás, Universidad Politécnica de Cartagena, 2011
- Det Norske Veritas Industri Norge, A.S. Recommended Practice Rp B401
Cathodic Protection Design. 2005



- Estudio de recubrimientos protectores en ambiente marino para la aleación de magnesio AZ31B mediante el líquido iónico LMP-102.
Blanca Roncero Peña, Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.

Las siguientes páginas web fueron consultadas en el periodo comprendido entre Junio de 2012 y Marzo de 2013:

- www.guldager.es/
- www.slideshare.net/intronaval/proteccion-catodica-nodos-de-sacrificio
- www.bluewaterboats.com.ar/articulos/corrosion.htm
- www.frlp.utn.edu.ar/materias/proteccion/proteccioncatodica.pdf
- bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/079/htm/sec_8.htm
- www.slideshare.net/sevilla_carlos2004/sistemas-de-proteccion-catodico-y-anodico#btnNext
- elistas.egrupos.net/cgi-bin/eGruposDMime.cgi?K9D9K9Q8L8xumopxC-qjd-uluCXPSPRCvthCnoqdy-qlhhyCVVTVQjfb7
- foro.latabernadelpuerto.com/showthread.php?t=42989
- www.docentes.unal.edu.co/napinzonc/docs/Proteccion%20catodica.pdf
- cingal.net/html_es/02-productos04.html