

Comportamiento mecánico y corrosión marina de diversas aleaciones férricas utilizadas en buques y en sus componentes

Autora: Nuria Varela-Fernández

Tesis doctoral UDC 2016

Director: Juan José Galán Díaz

Programa de doctorado de Ingeniería Marítima



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Comportamiento mecánico y corrosión marina de diversas aleaciones férricas utilizadas en buques y en sus componentes

Autora: Nuria Varela-Fernández

Tesis doctoral UDC 2016

Director: Juan José Galán Díaz

Programa de doctorado de Ingeniería Marítima



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Don Juan José Galán Díaz Profesor de la Universidade da Coruña en calidad de director, acredita que la tesis, titulada *Comportamiento mecánico y corrosión marina de diversas aleaciones férricas utilizadas en buques y en sus componentes*, cuya autora es Doña Nuria Varela Fernández cumple los requisitos necesarios para optar al título de Doctora.

A la memoria de mi padre

Agradecimiento

Al finalizar el presente trabajo son muchas las personas que se me vienen a la mente por la ayuda que me han brindado durante todos estos años. Entre ellos quiero destacar a mi familia por el apoyo moral y motivador que me han dado, mi madre, mi hermana y mi marido.

También quiero dar las gracias a mis compañeros de trabajo y de la Universidad, sin sus consejos, ayuda y facilidad en el trabajo me sería imposible la realización de la misma.

Por último, no podría ser menos, a mi director de tesis Juan José Galán Díaz que me ha guiado en todos estos años y que no permitió que me desmoralizase ni que abandonase el presente trabajo. Además, su constante ayuda en el laboratorio permitió refinar algunos aspectos que no estaban lo suficientemente claros.

Resumo

A corrosión é un problema que afecta diferentes partes do barco, tanto as expostas aos elementos como o interior do buque.

Un factor importante no cumprimento de prazos é motor, pero tamén que a súa fabricación garanta a fiabilidade. Para determinar a adecuación do material do motor, as distintas partes son examinadas por medio dun análise químico, e unha análise de espectrografía e unha proba de tracción.

Os procesos que causan corrosión foron estudados no Cuarto capítulo como estudio previo aos seguintes capítulos. Revisáronse os posibles elementos implicados na súa aparición e a nomenclatura diferente dependendo da mesma, e os seus efectos.

Posteriormente a corrosión interna tras tanques dun buque é estudada por ultrasóns examinando materiais tanques de auga e tanques de lastre, examinando as diferenzas en canto ao fin ao que está dedicado cada tanque.

Finalmente, estúdiáanse dous casos de corrosión, un en cuberta e outro no casco do buque. Realízase un estudo dos resultados tras a medición de ultrasóns do grosor da folla e reflicte na súa función da localización dos efectos de fallo. A inspección realizouse tanto na obra morta do buque como na obra viva.

Resumen

La corrosión es un problema que afecta a diferentes partes del buque, tanto para las expuestas a la intemperie como las interiores del buque.

Un factor importante a la hora de cumplir plazos establecidos es el motor, pero también su fabricación que asegura la fiabilidad del mismo. Para determinar la idoneidad del material del motor, las diferentes piezas se han examinado a través de un análisis químico, espectrográfico y de un ensayo de tracción.

Los procesos que provocan la corrosión han sido estudiados en el capítulo Cuarto como estudio previo a los siguientes capítulos. Se han revisado los posibles elementos implicados en su comienzo y la diferente nomenclatura dependiendo de los mismos, así como, sus efectos.

Posteriormente se estudia la corrosión interna de los tanques de un buque, examinando por medio de ultrasonidos los materiales de los tanques de agua y los tanques de lastre, examinando las diferencias según el fin al que está dedicado cada tanque.

Finalmente se estudian dos casos de corrosión en cubierta y en el casco del buque. Se realiza un estudio de los resultados obtenidos tras la medición del espesor mediante ultrasonidos de la chapa y se reflexiona sobre sus efectos dependiendo de la localización del fallo. La inspección se realiza tanto la obra muerta del buque como en la obra viva.

Abstract

The corrosion is a problem that it affects to different parts of the ship, so much for exhibited outdoors like the interiors of the ship.

An important factor at the time of fulfilling established period is the engine, but also its manufacture that assures the reliability of the same one. To determine the suitability of the material of the engine, the different pieces have been examined across a chemical analysis, spectrographic test and of a tensile test.

The processes, that cause the corrosion, have been studied in the chapter Fourth as previous study of the following chapters. There have been checked the possible elements involved in its beginning and the different nomenclature depending on the same ones, as well as, its effects.

Later, it is studied the internal corrosion of the tanks of a ship, examining by means of ultrasounds the materials of the water tanks and the ballast tanks, examining the differences as the end to which every tank is dedicated.

Finally, two cases of corrosion are studied in the deck and in the hull of the ship. A study of the results obtained after the measurements of the thickness was realized by means of ultrasounds of the sheet and one reflects on its effects depending on the location of the mistake. The inspection was realized in the parts which was or not submerged.

| | |
|---|-----|
| MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS | 7 |
| Capítulo 1. Introducción | 11 |
| 1.1 Preliminares | 13 |
| 1.2 Aspectos básicos de un motor: Descripción y Funcionamiento..... | 15 |
| 1.2.1 Culata | 16 |
| 1.2.2 Bloque..... | 17 |
| 1.2.3 Camisa..... | 19 |
| 1.2.4 Pistón..... | 23 |
| 1.2.5 Biela..... | 25 |
| 1.2.6 Cigüeñal..... | 28 |
| 1.3 Procesos de fabricación los principales componentes de un motor | 31 |
| 1.3.1 Fabricación Bloque | 31 |
| 1.3.2 Fabricación Culata | 33 |
| 1.3.3 Fabricación de la camisa | 35 |
| 1.4 Bibliografía | 38 |
| Capítulo 2. Materiales y métodos experimentales..... | 41 |
| 2.1 Introducción..... | 43 |
| 2.2 Ensayo de tracción..... | 44 |
| 2.3 Dureza..... | 50 |
| 2.4 Análisis químico | 52 |
| 2.5 Análisis metalográfico | 54 |
| 2.6 Bibliografía | 59 |
| Capítulo 3. Resultados y discusión | 61 |
| 3.1 Aspectos básicos de la técnica..... | 63 |
| 3.2 Resultados bloque..... | 67 |
| 3.3 Resultados culata..... | 74 |
| 3.3.1 Elementos químicos determinantes para una culata | 79 |
| 3.4 Resultados camisa | 81 |
| 3.4.1 Elementos químicos determinantes en la camisa..... | 87 |
| 3.5 Apéndice | 89 |
| 3.6 Bibliografía | 95 |
| Capítulo 4. Mecanismos de corrosión. Antecedentes y conceptos previos | 97 |
| 4.1 Introducción..... | 99 |
| 4.2 Polarización..... | 100 |
| 4.2.1 Polarización de concentración o difusión..... | 102 |
| 4.2.2. Polarización de resistencia | 103 |

| | |
|---|-----|
| 4.2.3 Polarización de activación | 104 |
| 4.2.4 Características generales de las curvas de polarización. | 105 |
| 4.2.4.1 Ánodo..... | 105 |
| 4.2.4.2 Cátodo..... | 106 |
| 4.2.4.3 Mecanismo de la reducción de oxígeno | 108 |
| 4.2.4.4 Factores que afectan a la movilidad del oxígeno | 109 |
| 4.2.4.5 Cálculo de i_d (leyes de difusión)..... | 109 |
| 4.3 Pasivación | 110 |
| 4.3.1 Concepto | 110 |
| 4.3.2 Mecanismos de pasivación..... | 111 |
| 4.3.2.1 Formación de la capa de metal oxidado..... | 112 |
| 4.3.2.2 Crecimiento de la capa formada..... | 113 |
| 4.3.2.3 Características de la curva de polarización anódica en materiales metálicos pasivables | 113 |
| 4.3.2.4 Pasivación en condiciones reales de operación. Selección de materiales metálicos resistentes a la corrosión electroquímica..... | 115 |
| 4.3.2.4 Sumario | 116 |
| 4.3.2.5 Selección del material | 116 |
| 4.3.2.6 Influencia de algunas variables sobre las características de las curvas de pasivación..... | 117 |
| 4.3.3 Repasivación | 119 |
| 4.3.3.1 Rotura local de la película pasiva..... | 120 |
| 4.4 Corrosión galvánica..... | 121 |
| 4.4.1 Extensión de la pila galvánica..... | 124 |
| 4.4.2 Factores que influyen en la cinética de corrosión en fenómenos de corrosión galvánica | 125 |
| 4.4.3 Fenómenos de corrosión galvánica derivados de aspectos microestructurales | 127 |
| 4.4.4 Protección catódica por ánodos de sacrificio..... | 127 |
| 4.4.5 Ejemplo para el casco de un barco (Fig. 4.20) | 128 |
| 4.4.5.1 Series galvánicas | 129 |
| 4.4.5.2 Inversión de polaridad | 129 |
| 4.5 Corrosión por picadura | 130 |
| 4.5.1 Factores que propician el inicio o incubación de la picadura | 130 |
| 4.5.2 Mecanismo de progreso de la picadura | 131 |
| 4.5.3 Potencial de picadura | 132 |
| 4.5.4 Factores que afectan al potencial de picadura | 132 |
| 4.5.5 Concepto de potencial de picadura | 133 |

| | |
|--|-----|
| 4.5.6 Evaluación de la susceptibilidad a la corrosión por picadura..... | 137 |
| 4.6 Acción conjunta de factores electroquímicos y mecánicos..... | 139 |
| 4.6.1 Corrosión – Fricción (Fretting-corrosion) | 139 |
| 4.6.1.1 Mecanismo de la corrosión – fricción | 139 |
| 4.6.1.2 Recomendaciones para la prevención de fenómenos de corrosión- fricción..... | 140 |
| 4.6.2 Corrosión-erosión | 140 |
| 4.6.3 Corrosión-cavitación | 144 |
| 4.6.3.1 Mecanismo de la corrosión-cavitación | 144 |
| 4.7 Corrosión en contacto con los medios naturales..... | 146 |
| 4.7.1 Introducción | 146 |
| 4.7.2 Formación de la película de humedad sobre la superficie expuesta . | 147 |
| 4.7.2.1 Mecanismo de la corrosión atmosférica | 147 |
| 4.7.3 Influencia de distintos factores sobre la velocidad de corrosión de los materiales metálicos en contacto con la atmósfera | 148 |
| 4.7.4 Predicción de datos de corrosión atmosférica | 151 |
| 4.7.5 Métodos de protección contra la corrosión atmosférica..... | 152 |
| 4.7.6 Corrosión en contacto con agua dulce..... | 152 |
| 4.7.6.1 Factores que influyen en el nivel de agresividad del agua dulce | 153 |
| 4.7.6.2 Recomendaciones para reducir el riesgo de corrosión de materiales metálicos en contacto con agua dulce | 154 |
| 4.7.7 Corrosión marina | 154 |
| 4.7.7.1 Influencia de la profundidad a la que se sitúa el material metálico | 156 |
| 4.7.7.2 Incrustaciones | 157 |
| 4.7.8 Corrosión de materiales metálicos enterrados..... | 157 |
| 4.7.8.1 Reacciones de corrosión en contacto con el suelo | 158 |
| 4.7.8.2 Características del suelo como medio agresivo | 158 |
| 4.7.9 Mecanismos de corrosión por micro y macropilas | 160 |
| 4.7.9.1 Fenómenos de corrosión originados por corrientes vagabundas o erráticas | 161 |
| 4.7.9.2 Fenómenos de corrosión por picadura en estructuras metálicas enterradas | 162 |
| 4.8 Aleaciones resistentes a la corrosión | 163 |
| 4.8.1 Criterio básico de elección del material | 163 |
| 4.8 Aleaciones resistentes a la corrosión en torno al sistema ternario Fe-Cr- Ni | 163 |
| 4.8.1 Aspectos microestructurales | 163 |
| 4.8.3 Aceros inoxidables..... | 165 |

| | |
|--|-----|
| 4.8.4 Aleaciones de base cobre resistentes a la corrosión | 168 |
| 4.8.5 Aleaciones Cu-Ni, Cu-Al y Cu-Be | 169 |
| 4.8.6 Aleaciones ligeras resistentes a la corrosión | 170 |
| 4.8.6.1 Aluminio y sus aleaciones | 170 |
| 4.8.6.2 Magnesio y sus aleaciones | 170 |
| 4.8.6.3 Titanio y sus aleaciones | 171 |
| 4.8.6 Materiales metálicos resistentes a la corrosión de desarrollo más reciente | 171 |
| 4.8.7.1 Aleaciones obtenidas por solidificación rápida. Vidrios metálicos | 171 |
| 4.8.7.2 Superaleaciones para alta temperatura | 172 |
| 4.8.7.3 Recubrimientos para alta temperatura. Barreras térmicas. | 172 |
| 4.9 Caracterización de la corrosión | 174 |
| 4.9.1 Modelos matemáticos | 188 |
| 4.9.2 Corrosión en armaduras de hormigón | 191 |
| 4.9.3 Corrosión en otros medios | 194 |
| 4.10 Bibliografía | 205 |
| Capítulo 5. Estudio de la corrosión marina en buques | 213 |
| 5.1 Introducción | 215 |
| 5.2 Visión general | 216 |
| 5.3 Datos | 216 |
| 5.4 Análisis de los datos obtenidos | 219 |
| 5.4.1 Pique de proa | 219 |
| 5.4.2 Tanque sanitario | 223 |
| 5.4.3 Tanque nº1A Central | 225 |
| 5.4.4 Tanque doble fondo nº 1 BR | 226 |
| 5.4.5 Tanque doble fondo nº 1 ER | 227 |
| 5.4.6 Tanque doble fondo nº1 Central | 228 |
| 5.4.7 Tanque nº2 doble fondo Br | 230 |
| 5.4.8 Tanque nº 1 profundo ER | 231 |
| 5.4.9 Tanque nº2 profundo ER | 232 |
| 5.4.10 Tanque agua dulce nº 13 Br | 233 |
| 5.4.11 Tanque agua dulce nº 13 Er | 234 |
| 5.4.12 Tanque nº 2 profundo Br | 235 |
| 5.5 Sumario | 237 |
| 5.6 Bibliografía | 239 |
| Capítulo 6. Caso B. Estudio de la corrosión en el casco de un buque | 241 |
| 6.1 Introducción | 243 |

| | |
|---|-----|
| 6.2 Estudio | 244 |
| 6.2.1 Estado del buque | 245 |
| 6.2.2 Estado detallado del buque..... | 247 |
| 6.3 Sumario | 258 |
| 6.4 Bibliografía | 260 |
| Capítulo 7. Caso C. Estudio de la corrosión en cubierta | 261 |
| 7.1 Introducción..... | 263 |
| 7.2 Previo | 263 |
| 7.3 Inspección visual | 264 |
| 7.3.1 Puente abierto | 265 |
| 7.3.2 Techo puente..... | 266 |
| 7.3.3 Cubierta puente | 268 |
| 7.3.4 Cubierta | 271 |
| 7.4 Sumario | 284 |
| 7.5 Bibliografía | 285 |
| Capítulo 8. Conclusiones | 287 |
| Capítulo 9. Investigaciones futuras | 291 |
| Índice de figuras, gráficos, imágenes y tablas..... | 295 |

MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

MOTIVACIÓN DE LA PRESENTE TESIS

La fabricación de los componentes de un barco es altamente contaminante debido al proceso industrial que ello implica, generando residuos sólidos y residuos atmosféricos. Existen en la actualidad modos alternativos para la fabricación de dichos materiales que tratan de minimizar el impacto ambiental, algunos de ellos se estudian en la presente tesis al objeto de validar su comportamiento y sustituir a los convencionales.

Así mismo, es conocido el impacto de la corrosión sobre el comportamiento económico y la duración de los buques en general. Teniendo en cuenta las reparaciones de casos reales que se han producido en los astilleros españoles se trata de obtener unas causas objetivas que expliquen dicho deterioro. En este caso hemos de sujetarnos a un acuerdo de confidencialidad.

OBJETIVOS E INTERÉS DE LA TESIS

La presente tesis doctoral trata sobre el comportamiento mecánico de algunos materiales utilizados en las construcciones de buques. Su estudio reviste importancia en tanto en cuanto un inadecuado material redunda en el coste final del proceso. Además, las paradas no programadas de los buques aumentarían de manera significativa. Al objeto de proceder de una manera metódica se han caracterizado las propiedades mecánicas de las siguientes fundiciones: EN-GJS-400-15U, EN-GJS-500-7U, EN-GJL-200, que corresponden a distintos tipos de fundiciones esferoidales y fundición gris respectivamente.

Dicha caracterización se ha realizado como se indica:

- a) Análisis químico del material.
- b) Ensayo de tracción, para obtener las gráficas tensión-deformación.
- c) Ensayo de dureza.
- d) Determinación de la forma y tamaño del grafito mediante el microscopio.

Todos estos ensayos se han llevado a cabo de acuerdo con las normas correspondientes que se citan en la bibliografía.

Además, también se han estudiado tres casos reales de corrosión en buques procediéndose a dar una explicación de la causa de la degradación del material sin comprometer la confidencialidad a la que nos vemos sometidos.

Como se ha dicho, el interés de esta tesis radica fundamentalmente en evitar sobrecostes en los procesos de fabricación y vida de los buques, teniendo en cuenta que Galicia es una región en la que el mundo marítimo se halla muy presente.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

A continuación, se comenta brevemente el contenido de los capítulos en los que está estructurada la tesis. En el **Capítulo 1** se revisa el estado del arte y las características básicas de los componentes de un buque, fundamentalmente el motor. En el **Capítulo 2** se describen los métodos experimentales, así como los materiales utilizados y su calibración. En el **Capítulo 3** se explican y se discuten los resultados. En el **Capítulo 4** se da una explicación general de los mecanismos de corrosión, así como un estado del arte básico. En el **Capítulo 5** se estudia la corrosión en los tanques y en la cubierta para el caso concreto de un buque. Finalmente, las conclusiones a las que se han llegado al examinar todos los datos. Cada uno de los capítulos lleva su propia bibliografía. Finalmente se adjunta como apéndices las tablas de las normas utilizadas.

Capítulo 1. Introducción

Capítulo 1: Introducción

1.1 Preliminares

Un motor es un dispositivo que transforma cualquier tipo de energía en energía mecánica.

En el caso del barco es un elemento que es capaz de generar la fuerza suficiente para realizar el movimiento del barco, de su tripulación y carga, pero también puede ser el elemento que proporcione energía eléctrica, en cuyo caso hablaremos de buques con propulsión eléctrica, análogamente a la función que realizan los motores en las instalaciones terrestres como hospitales (suministro de electricidad en situaciones de emergencia para realización de operaciones urgentes o mantenimiento del suministro eléctrico durante un corte del mismo), centrales térmicas, centrales de cogeneración, etc.

Es fundamental que sus elementos integrantes estén debidamente coordinados y calculados para que, tanto en potencia como en calidad de trabajo, desarrollen el máximo rendimiento posible.

El movimiento del motor empieza con el arranque y se produce bien utilizando un arrancador o bien del aire de arranque. Este último método consiste en inyectar aire comprimido a la presión adecuada en los cilindros (debe tener suficiente presión para ser capaz de iniciar el movimiento longitudinal de los cilindros) y se ha cortado cuando el motor adquiera un valor de revoluciones determinado. Una vez comenzado el movimiento mediante el cigüeñal el ciclo normal empieza a desarrollarse. En este momento la velocidad se mantendrá constante debido al combustible inyectado dentro de los cilindros (por medio de la bomba de combustible y el inyector) y al aire introducido.

Como se ha dicho anteriormente el motor es un conjunto coordinado de piezas: el movimiento del cigüeñal promueve las del resto (eje de levas o camones, bombas, válvulas, balancines), dicha transmisión se lleva a cabo a través de diferentes engranajes, correas o palancas, dependiendo del tamaño del motor y de su diseño.

La configuración del motor determinará su potencia. Entre las abundantes configuraciones existentes destacaremos las siguientes, aunque dentro de ellas también puede haber variaciones que a su vez darán lugar a combinaciones diversas. Algunas de las cuales se comentan a continuación:

- Motor en línea. Este tipo se caracteriza por tener todos los cilindros alineados. Cada pistón tiene su biela y ésta un único apoyo en el cigüeñal.
- Motor en V. A diferencia de los anteriores en éste tipo hay dos líneas de cilindros que tienen un ángulo determinado (el ángulo lo determinará el fabricante y la potencia a desarrollar) entre ellos. En este cada pistón tiene su biela, pero cada dos bielas tienen el apoyo en la misma sección del cigüeñal.
- Motor con distintos números de cilindros. Dependiendo de la potencia y la función a desarrollar cada motor tendrá diferente número de cilindros (pudiendo ser en línea o en V).
- Motor sobrealimentado. Son los más comunes, y pueden ser también en V y en línea. Estos motores constan de un conjunto turbocompresor, este conjunto aumenta la potencia del motor al comprimir el aire de admisión y conseguir que entre mayor cantidad de aire en el cilindro.
- Motor con inyección electrónica o inyección convencional. La inyección electrónica consta de una centralita que está coordinada con el resto de elementos y facilita el paso del combustible en el momento adecuado teniendo en cuenta la velocidad del momento y la potencia a desarrollar. A diferencia de la inyección convencional reduce las pérdidas mecánicas derivadas de las diferentes partes y presenta un mayor rendimiento y fiabilidad.
- Diferentes tipos de combustible, dependiendo el tipo de combustible habrá que variar las bombas y el avance de inyección:
 - Gas.
 - Diesel.
 - Fuel-oil.

La elección de la configuración del motor vendrá impuesta en función de las características de la máquina, tipo de instalación y de las posibilidades que proporcione la planta en la que va a estar instalado. Por ejemplo, si un motor va a ser instalado en una ciudad sin acceso a agua salada toda la refrigeración deberá ser con agua dulce, pero si la instalación se realiza en un barco se tendrá en cuenta la posibilidad de usar el agua salada como medio refrigerante.

1.2 Aspectos básicos de un motor: Descripción y Funcionamiento

A continuación, se describirán las partes fundamentales de un motor y las que se han seleccionado para la parte experimental. El esquema adjunto es el corte de un motor en el que se señalan las partes que se van a tratar para poder ver su localización exacta.

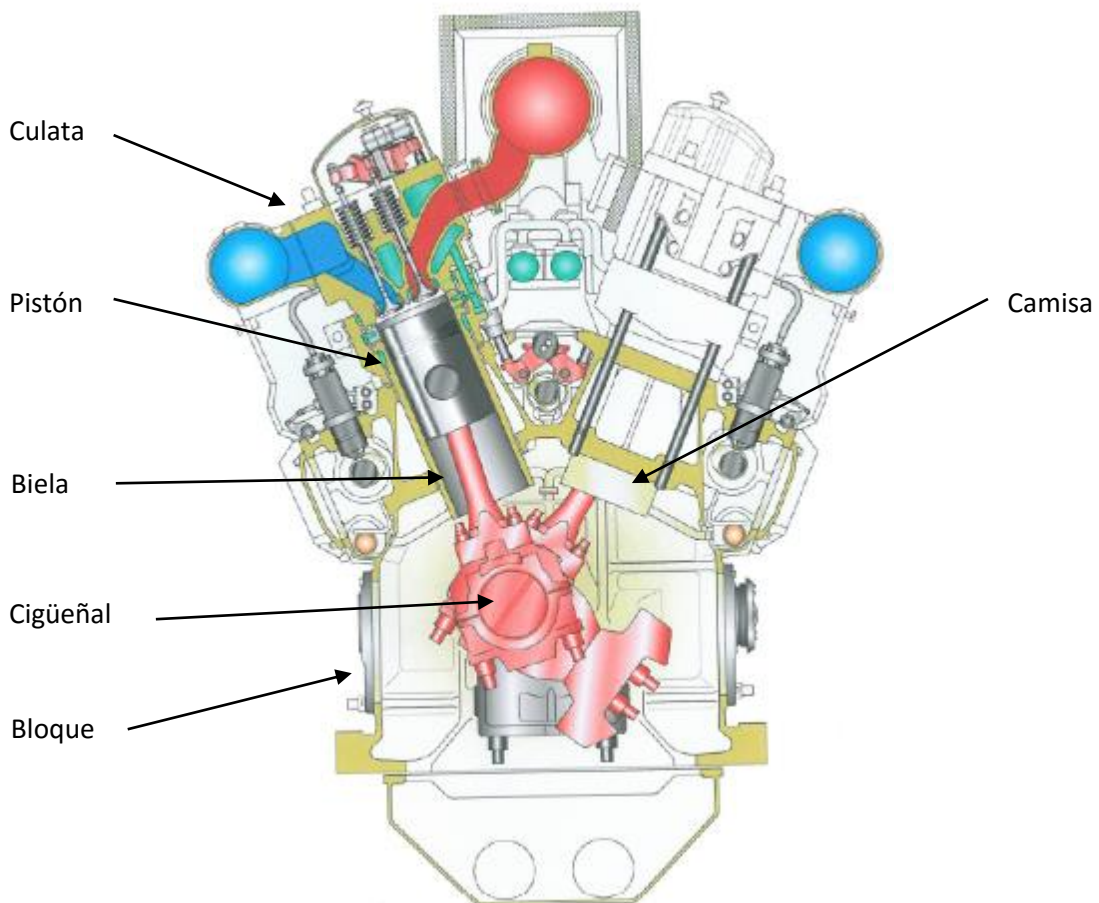


Imagen 1.1. Partes del motor.

1.2.1 Culata

La culata es la parte de un motor de combustión interna que sella la cámara de combustión, de este modo produce el cierre hermético y así conseguir que se produzca trabajo en el cigüeñal a través de la biela.

En ella se alojan los elementos necesarios para el funcionamiento del motor:

- Válvulas de admisión.
- Válvulas de escape.
- Inyector.
- Purga.
- Válvula de seguridad.

Necesita de refrigeración, para ello presentan una doble pared por la que circula el líquido refrigerante (agua tratada) y no permite la mezcla con el líquido lubricante (aceite) con su entrada en la cámara de combustión. La cámara de refrigeración de la culata debe ser mejorada para optimizar el proceso de refrigeración [1].

Encima de las válvulas están situados los balancines, elementos necesarios para realizar el ciclo completo del motor, que son comandados por los camones o levas instalados en el bloque.

La principal función de la culata y del sistema de anclaje de la misma es ser resistente a la presión de los gases y así permitir que toda la energía generada dentro de la cámara se traduzca en trabajo efectivo. También debe garantizar la seguridad de los operadores de los motores y evitar accidentes. La unión de la culata con el motor se puede hacer por medio de pernos, pero entre ésta y el bloque del motor debe existir una junta para evitar las pérdidas de fluidos al exterior [2]. Esta junta debe ser lo más fina posible, por esta razón es frecuente utilizar juntas metálicas [3].

Por ejemplo, la presión de encendido de un motor de 7680 kW oscila entre 20 a 25 bares con una presión de combustible de 6 a 8 bar, esto aporta una visión de la presión que soporta por su parte inferior.

Es imprescindible que posea:

- Buena conductividad térmica.
- Resistencia a la corrosión.
- Coeficiente de dilatación igual al bloque de cilindros (elemento con el que sella la cámara de combustión).
- Resistente a la presión de los fluidos que circulan por ella.

Además, por su interior circula agua a una temperatura de unos 38°C y una presión de 3 bares. Es necesario que esta temperatura permanezca constante con el fin de evitar tensiones térmicas que pudieran ocasionar un gradiente de temperatura suficiente para producir grietas en el material.

Los gases de escape tienen su salida por el interior de la culata. En algunos motores la temperatura de estos gases llega a alcanzar los 600 °C, es de vital importancia que la culata no sufra daños estructurales ni desgaste material por la circulación de estos gases.

Dependiendo del tamaño del motor las culatas pueden ser construidas de las siguientes formas:

- Un bloque que contenga todas las culatas, lo que es común en motores de pequeña potencia.
- Cada una de forma individual.

1.2.2 Bloque

El bloque, también llamado bastidor, es la parte exterior del motor, también es la parte que ocupa más espacio. Es una pieza fundida en hierro, y en cuyo interior se alojan los siguientes elementos:

- Cilindros.
- Soportes de apoyo del cigüeñal.
- Conductos de refrigeración.
- Conductos de lubricación.

La configuración del motor depende de esta pieza, debido a que el número de cilindros y la relación de diámetro/carrera del pistón determinarán la potencia del motor.

Una característica fundamental del bastidor es que se construye de una sola pieza mediante fundición de hierro. Debido a que es la pieza estructural del motor tiene una gran rigidez porque debe soportar las vibraciones derivadas de las combustiones que ocurren en su interior. Li et al [4] determinaron las vibraciones que soporta el bloque durante la combustión y durante su normal funcionamiento. Tanto en el caso de la culata como en el del bloque las vibraciones que soportan son resonantes. Ettefagh et al [5] estudiaron la importancia de analizar las vibraciones en el momento de la combustión, su método fue realizado con acelerómetros.

También debe ser suficientemente robusto para soportar las presiones de los distintos fluidos que circulan, en el caso de que existan cámaras de agua en su interior o conductos para el aceite. Para conseguir dicha robustez tienen unos tirantes que van desde el borde inferior del cojinete básico colgante hasta la parte superior del bastidor. Hay otros tirantes que están emplazados desde la culata hasta la parte media del bastidor. El objetivo de estos tirantes es aliviar las fuerzas provocadas por las combustiones dentro de las camisas.

El bloque puede tener alojamientos para instalar diferentes elementos, por ejemplo:

- Alojamiento para los árboles de levas (pueden ser uno, dos o tres dependiendo de la configuración del motor).
- Aperturas para el control de dispositivos acoplados a engranajes controlados por el cigüeñal:
 - Bomba de agua de alta temperatura.
 - Bomba de agua de baja temperatura.
 - Bomba de combustible.
 - Bomba de aceite.
 - Distribuidor de aire de arranque.
 - Arrancador.

El bloque está constituido de un material que permite el moldeo y torneado de sus elementos para un óptimo acabado final. La perfección en el acabado final es de vital importancia en la disminución de desgastes, fricciones y vibraciones. Hay que controlar todas las medidas y tolerancias a la perfección para que todos los elementos del motor encajen dentro de él sin holguras excesivas ni mínimas, sino en su medida adecuada, que ya está calculada de tal modo para que el motor tenga una vida útil larga.

Antes de empezar el montaje de un motor es muy importante que esta parte del motor esté perfectamente limpia, gracias a esto evitaremos averías muy graves en el futuro.

1.2.3 Camisa

La camisa es el elemento en cuyo interior se realiza la combustión, es por ello que también recibe el movimiento del pistón y es susceptible a desgastes y rozamientos, así como tensiones térmicas, altas presiones y temperaturas. Jialong [6] realizó un estudio del esfuerzo al que se ve sometida la camisa debido a la diferencia de temperaturas entre su parte externa e interna, en su parte interna puede alcanzar unos 400 o 600 °C mientras que en la parte externa está en contacto con el agua de refrigeración que tendrá una temperatura menor a 100°C.

La camisa es cerrada por su parte superior por la culata y de esta forma se convierte en el compartimento estanco necesario para realizar la combustión. Las camisas son fabricadas en hierro fundido.

El origen de la potencia que tiene el motor es la combustión, que es un proceso exotérmico derivado de la mezcla aire-combustible y de la presión a la que se ve sometida dicha mezcla. Esta potencia mecánica puede ser aprovechada de dos formas principalmente:

- Generar energía eléctrica (si el motor se encuentra acoplado a un alternador).
- Generar movimiento (si el movimiento se encuentra acoplado a la hélice del barco).

La reacción química de combustión que ocurre en el interior de la camisa desplaza el pistón hacia la parte inferior de la camisa y a través de la biela transmite ese mismo movimiento al cigüeñal que a su vez lo transmite al elemento que tenga acoplado.

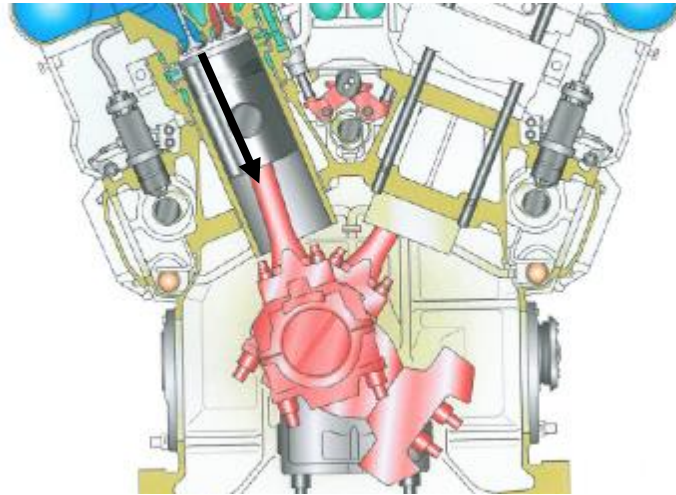


Imagen 1.2. Detalle del movimiento del pistón.

Después de la descripción hecha para la camisa se desprende que estará expuesta a las siguientes fuerzas:

- Fricción del pistón.
- Fricción de los aros del pistón.
- Tensiones térmicas por el cambio de temperatura (combustión, entrada de combustible y entrada de aire).
- Vibraciones por su propia combustión.
- Vibraciones de las camisas adyacentes debido a sus combustiones.

El material de las camisas ha de ser capaz de soportar las vibraciones, los cambios bruscos de temperatura, las explosiones constantes provocadas por la combustión y al movimiento continuo del pistón. Hongwei et al [7] establecieron que lo más importante es que la camisa tenga una forma adecuada para facilitar el enfriamiento y reducir la carga termal.

El factor que determina la potencia del motor es la relación entre el diámetro y la carrera; esta relación también condiciona la cantidad de aire y combustible que entran dentro de la camisa para producir la combustión. Todo

ello unido y bien coordinado realiza los procesos necesarios para tener ese trabajo.

La camisa consta de las siguientes zonas:

- 1: Zona en la que no se produce combustión ni deslizamiento del pistón. Esta es la zona más pequeña, y se encuentra entre el Punto Muerto Superior, PMS, (punto más alto al que llega el pistón) y la culata.
- 2: Zona en la que se produce la combustión y el deslizamiento del pistón. Esta zona experimentará tanto la reacción de combustión como el movimiento del pistón, debe estar adecuadamente preparada para poder soportar la fricción y los cambios de temperatura sin variar su forma ni sufrir daños.
- 3: Zona en la que se únicamente se realiza movimiento del pistón. Esta zona se encuentra entre el Punto Muerto Inferior, PMI, (punto más bajo al que llega el pistón) y el final de la camisa.

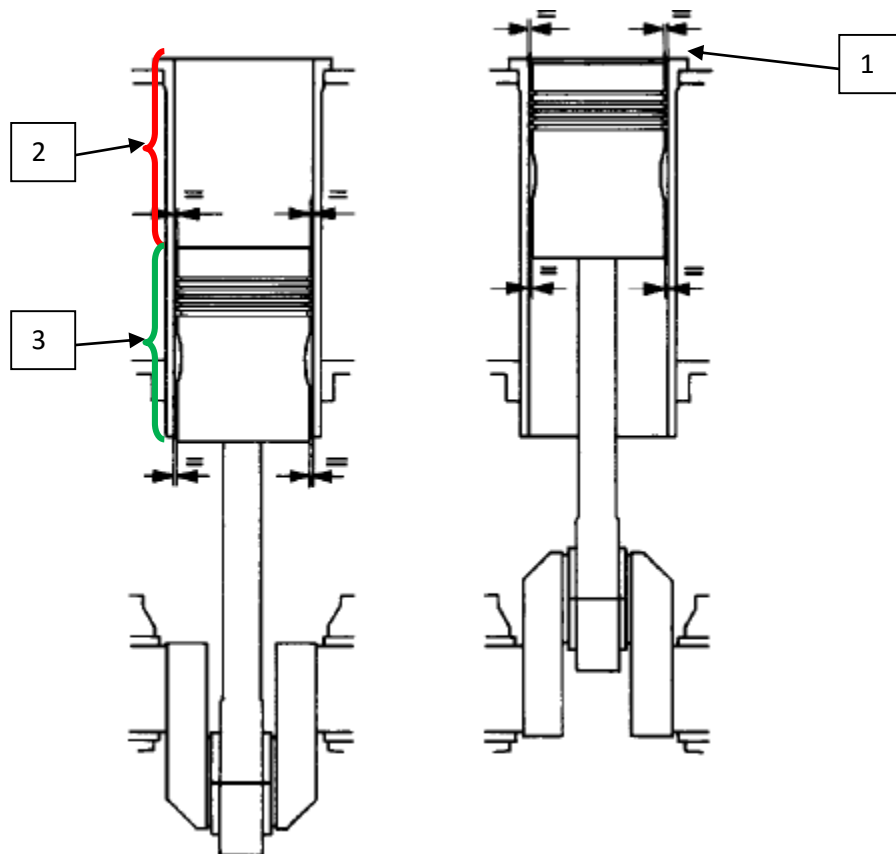


Figura 1.1. Partes de la camisa.

La camisa está terminada con la técnica del bruñido para poder mantener una capa de aceite y así estar lubricada frente al paso del pistón y que no se produzcan averías. Este acabado se realiza mediante arranque del metal y asegura una rugosidad superficial suficiente para mantener aceite en la superficie y de esta forma asegurar el movimiento del pistón con seguridad. Con un buen acabado de la camisa se consiguen los siguientes objetivos:

- Menor desgaste del pistón.
- Menor desgaste de los aros del pistón.
- Mejora en la emisión de partículas.
- Menor consumo de aceite.
- Minimizar el rendimiento perdido debido a la fricción.

Además del acabado final se debe tener en cuenta la calidad de los materiales que formarán parte de la camisa para asegurar:

- Fundición libre de poros.
- Fundición libre de cavidades.
- Estructura homogénea.
- Dureza uniforme.

Si no se evitan todos estos defectos pueden provocar roturas puntuales de la camisa, produciéndose así la contaminación del aceite del motor, la pérdida de tiempo y materiales reparando dicha avería. Esto puede suponer pérdida de tiempo en entregar de la carga que en determinados contratos pueden ser pérdidas millonarias.

Entre la camisa y el bastidor o bloque hay un espacio que se utiliza para la circulación de agua; éste agua refrigera la camisa y después de realizar esta labor se dirige hacia las culatas y enfría a éstas.

No existe una única configuración de la camisa, sino que es posible distinguir las siguientes:

- De un solo componente.
- De dos.
- De tres (camisa, anillo de soporte y anillo de alma superior).

La división de la camisa se realiza para garantizar una mayor resistencia a las deformaciones, una mejor refrigeración de los componentes y mejores dilataciones.

La camisa realizará un cierre estanco con la culata. Este cierre estanco asegurará que no haya fugas de gases de escape, de agua o de aceite hacia otras partes del motor.

1.2.4 Pistón

El pistón es un cilindro que trabaja en el interior de la camisa para realizar el ciclo completo (dependiendo del motor de 2 tiempos o de 4 tiempos). En un motor de 4 tiempos el pistón cumple las siguientes funciones:

- Compresión de la mezcla aire-combustible para hacer la combustión.
- Ayuda en el desalojo de los gases de escape y su total limpieza.
- Transmisión a la biela y en consecuencia al cigüeñal de la fuerza generada tanto en la combustión como en la admisión de aire.

El pistón debe realizar un cierre estanco para que la combustión que se realiza entre él y la culata no trascienda hacia otras partes del motor, es por ello que debe tener una medida lo más aproximada posible al diámetro de la camisa. También es cierto que no puede ser el mismo diámetro que la camisa debido a que si la medida fuese la misma no podría realizar el movimiento rectilíneo. La unión con la biela se realiza a través de un bulón, que se fija con anillos de seguridad para evitar el movimiento del mismo.

Otro factor a tener en cuenta en el pistón son los gradientes de temperatura a los que se ven sometidos, es decir, en la parte superior del pistón habrá altas temperaturas, pero en la inferior será mucho menor. Esto influye en diferentes factores:

- Dilataciones de la parte superior.
- Tensiones del material.
- Rozamientos con la camisa.
- Altas presiones en su parte superior.

Debido a lo descrito anteriormente muchos pistones tienen diferente diámetro en la parte superior que, en la inferior, porque en la parte superior de

pistón (cabeza) será dónde tengan que soportar mayor temperatura y mayores dilataciones. Mikalsen et al [8] propusieron como camino para mejorar la combustión del motor minimizar las vibraciones derivadas de la combustión y optimizar la ratio de compresión.

La estanqueidad del pistón con respecto a la camisa se consigue con una serie de aros flexibles. Éstos cumplirán diferentes cometidos en el pistón, por lo que estarán fabricados de diferentes materiales y revestidos de un material (por ejemplo, cromo) que les confiera la resistencia adecuada para el trabajo que deben realizar. El alojamiento de los aros está realizado de tal forma que sea resistente y no empiecen en él roturas del pistón.

En general (cada fabricante determinará el número y función de cada aro) podemos atribuirles las siguientes funciones:

- Aislamiento de la zona de combustión.
- Prevención de la entrada de partículas abrasivas.
- Reparto de aceite por la camisa.
- Protección de la película de aceite.
- Limpieza de restos de combustión de la camisa.

Como se deduce a través de lo dicho el motor estará sometido a diferentes esfuerzos y tensiones:

- Tensiones térmicas debido a altas temperaturas de los gases escape y menores temperaturas del aire de admisión. Este cambio de temperatura ocurre en un tiempo muy corto.
- Esfuerzo por las velocidades de subida y bajada.
- Dilataciones.

Muchos fabricantes construyen el pistón en dos piezas de diferentes materiales:

- Parte inferior en grafito esferoidal.
- Parte superior (corona) forjado, suele ser de diámetro inferior que la parte inferior para favorecer las dilataciones y el movimiento.

La razón de este doble material es debido a la disipación de calor que debe realizar el pistón en poco tiempo. También es necesario que el material sea resistente a las presiones de encendido. Ambas partes están unidas por medio de anillos de dilatación.

El aceite que permanece en la camisa y que reparte el pistón cumple un papel principal en la refrigeración de ambos elementos y de la prevención en la corrosión. Este aceite puede llegar a la camisa de varias formas, dependiendo del fabricante, vamos a citar dos:

- Un inyector situado en el bastidor y orientado de tal forma que llegue al punto indicado.
- A través de la biela.

Olander et al [8] investigaron cómo sería la mejor forma de realizar el acabado final del pistón, siendo mejor realizado en etapas, para mejorar la lubricación durante el funcionamiento normal del motor.

1.2.5 Biela

La biela es la pieza usada para la transmisión del movimiento del pistón al cigüeñal. Es un elemento que está sometida a diferentes esfuerzos:

- Tracción.
- Compresión.
- Estiramiento.
- Pandeo.
- Fatiga.

La biela consta de tres partes:

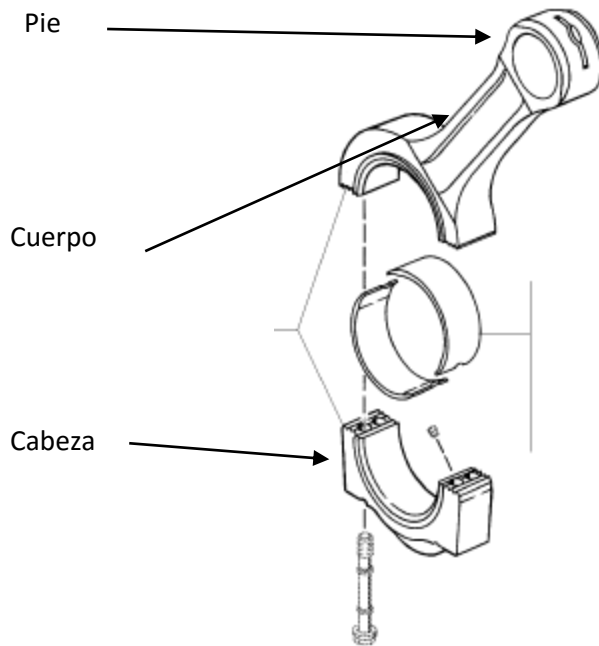


Figura 1.2. Partes de la biela.

- **Pie de biela.** Es la parte que realiza la conexión con el pistón, es la parte superior de la biela cuando se coloca en el motor. De los dos orificios que tiene la biela es el que tiene menor tamaño. En esta parte se inserta el bulón con su correspondiente casquillo y es éste el que realizará la unión con el pistón. En algunos motores para la colocación de este casquillo es necesario su enfriamiento, con la finalidad de tener un buen ajuste.
- **Cuerpo de biela.** Es el cuerpo, está sometida a esfuerzos de tracción y compresión debido al movimiento ascendente y descendente. Se debe tener en cuenta en esta parte sufre esfuerzo de tracción en el momento que el cigüeñal realiza el movimiento necesario para el descenso del pistón. El cuerpo de biela sufre esfuerzo de compresión en el momento que se produce la combustión, debido a ésta aparece una fuerza que obliga al pistón a realizar el movimiento descendente. Puede tener diferentes formas (de doble T o de cruz) dependiendo del fabricante y potencia del motor.
- **Cabeza de biela.** Es la parte en la que se conecta con el cigüeñal. Para poder realizar mantenimientos y sustituciones tiene dos partes, una que está conectada con la parte media y otra que se puede separar. Cuando se monta la biela se unen a través de tornillos y se aprietan con presión hidráulica. En su interior casquillos hay casquillos para evitar averías

durante el funcionamiento del motor. Durante la colocación de estos casquillos no son necesarios ni la presión ni el enfriamiento de los mismos, se deben colocar en la posición adecuada y apretar la cabeza de biela. Este casquillo está dividido en dos partes y cada una de ellas es diferente para asegurar el buen funcionamiento y porque cada una está sometida a diferentes esfuerzos.

Estos diferentes esfuerzos se deben al movimiento ascendente y al descendente. Cuando se produce la combustión la biela sufre un esfuerzo de compresión debido a la fuerza generada, ésta hace que el pistón se desplace hacia abajo. Olander et al [10] han investigado para optimizar el rendimiento del motor examinando el trabajo que realiza la biela conectada al cigüeñal, para ello utilizaron un muelle para medir la fuerza de fricción de la presión aplicada durante el trabajo del mismo.

Para poder resistir estos esfuerzos la biela debe ser fabricada con una buena fundición de acero y realizar con ella la óptima aleación. Hay que vigilar constantemente el estado del material para asegurarse la ausencia de poros y defectos en el material. Sirgurdsson et al [11] consideran que la compresión realizada durante la combustión es una variable para su modelo numérico para analizar el flujo existente dentro de la cámara de combustión.

La biela también está sometida a fatiga, debido a que realiza un movimiento continuado y cíclico. Con la fabricación de la biela se busca conseguir que el límite elástico sea lo mayor posible, para evitar fallos durante el funcionamiento. Todo el proceso de fabricación se realiza para evitar la aparición de grietas y como consecuencia para evitar que se produzca una rotura.

Durante el mecanizado también hay que observar la ausencia de ángulos vivos, de esta forma se eliminan zonas de concentraciones de tensión; esto se realiza para evitar rupturas por ese punto que podrían provocar daños personales y materiales. Si hubiese un ángulo vivo en una biela, sería por ese punto por dónde empezaría la ruptura de la pieza, para evitar esto la pieza está acabada con zonas redondeadas evitando ángulos rectos (90°).

En definitiva, la biela debe soportar:

- La fuerza derivada de la combustión.
- Peso del pistón.
- Movimiento descendente y ascendente.
- La fuerza que le transmite el cigüeñal, que se produce para empujar el pistón hacia la parte superior.
- Además, debe ser resistente a los gradientes de temperaturas que haya dentro del motor según el momento del ciclo en el que se encuentren su cilindro.

1.2.6 Cigüeñal

El movimiento lineal del pistón es transmitido al cigüeñal a través de la biela. El cigüeñal es un eje mecanizado que es el encargado de transformar el movimiento rectilíneo del pistón en un movimiento rotatorio. Torims et al [12] investigaron las principales razones de averías en el cigüeñal y éstas fueron las causadas por falta de lubricación. Esta lubricación es muy importante debido al movimiento rotatorio que experimenta el motor a grandes revoluciones.

Esta transmisión de fuerza se realiza debido a la conexión del pistón con el cigüeñal realizado a través de la biela. Cuando se produce la combustión el pistón se desplaza hacia abajo, es entonces cuando el pistón empuja a la biela hacia abajo y esta transmite esa fuerza a la muñequilla, en ese momento se genera un par motor instantáneo.

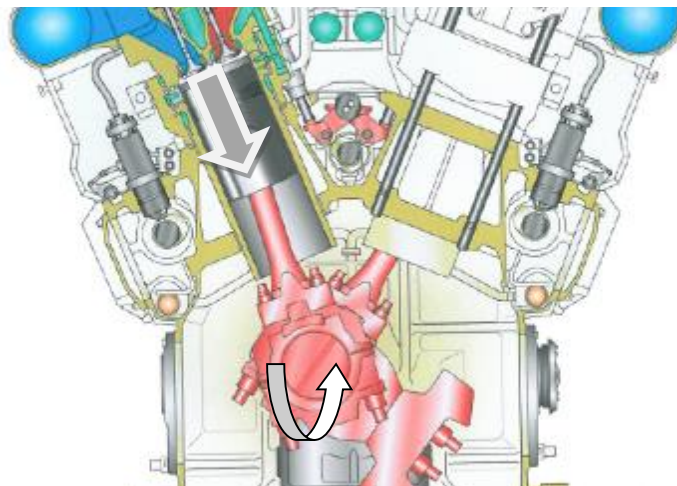


Imagen 1.3. Movimiento del cigüeñal con respecto al movimiento del pistón.

El cigüeñal está sujeto en sus apoyos. Debe estar bien equilibrado debido a que gira a gran velocidad y soporta diferentes fuerzas en cada punto a causa de las diferentes combustiones en los cilindros.

De acuerdo a la descripción se entiende que el material del que se fabrique el cigüeñal debe ser:

- Capaz de soportar los esfuerzos.
- Resistente a altas temperaturas.

El material, del que es fabricado el cigüeñal, es acero forjado. La elección de este sistema de fabricación se elige para:

- Conseguir unas dimensiones compactas.
- Obtener un determinado peso.
- Adquirir dureza y fuerza.

Después de realizar el primer paso se someterá a tratado, mecanizado y equilibrado, para conseguir unas óptimas características en la pieza. El tratamiento es de vital importancia para evitar tensiones o defectos en el material y así prevenir averías graves.

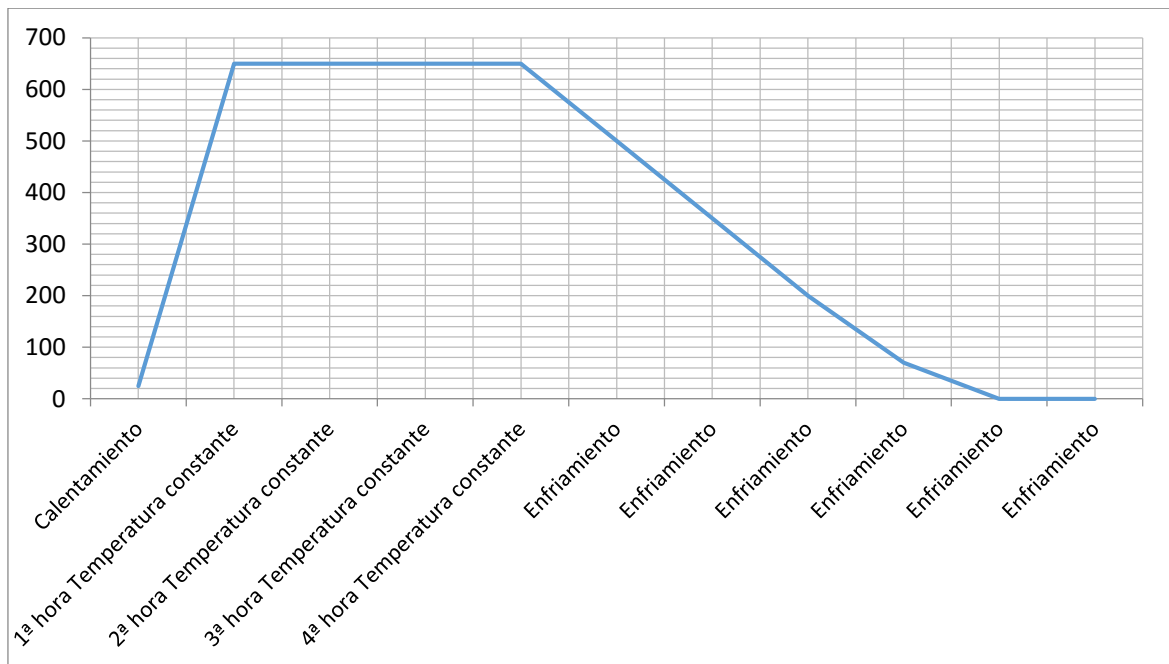
La parte más importante en el montaje es el equilibrado, para ello se colocan contrapesos en sus brazos y de esta forma conseguir una óptima compensación de masas. El acero forjado también le proporciona al cigüeñal una microestructura del grano homogéneo y con defectos insignificantes, lo que le confiere una mejor resistencia. El tratamiento posterior debe ser por recocido. El recocido se utiliza para:

- Elimina las tensiones residuales que hayan podido aparecer después de la fabricación.
- Aumentar:
 - o La plasticidad.
 - o Ductilidad.
 - o Tenacidad.
- Facilitar el mecanizado.
- Conseguir determinadas características mecánicas.
- Afinamiento del grano para conseguir evitar deformaciones que puedan aparecer durante el calentamiento.

Para realizar este tratamiento habrá que calentar la pieza a una determinada temperatura y realizar un enfriamiento lento y gradual hasta alcanzar la temperatura ambiente. Este enfriamiento se puede realizar en:

- El horno
- Fosos, en ellos se rodea la pieza con arena para que el enfriamiento sea todavía más lento.

A continuación, se muestra una gráfica de un proceso de recocido.



Gráfica 1.1. Gráfica tipo de recocido.

La primera fase es la de calentamiento, según el tipo de material se utilizará un tiempo determinado para llegar a una temperatura determinada. En el gráfico adjunto se partiría de una temperatura ambiente de 25°C hasta llegar a la temperatura de 650°C. En esta temperatura se mantendría durante 4 horas, es entonces cuando se forma la austenita. Cuando ya se ha completado la fase de mantenimiento de temperatura se realiza el enfriamiento gradual. Dependiendo de la pieza los valores de tiempo de permanencia, temperatura de mantenimiento y velocidad de enfriamiento variará, pero el perfil de la gráfica del tratamiento de recocido será el mismo.

La rueda impulsora para el accionamiento de los árboles de levas está montada en el lado de acoplamiento entre el cigüeñal propio y un corto trozo de eje que lleva la brida de acoplamiento y el cojinete de ajuste.

El cigüeñal gira a grandes velocidades es por ello que debe estar lubricado adecuadamente y en consecuencia proporcionar lubricación a los cojinetes de las bielas, muñequillas y apoyos del cigüeñal. Para este fin el cigüeñal tiene perforaciones y conductos que facilitan el paso del aceite, es por ello que su interior es hueco.

1.3 Procesos de fabricación los principales componentes de un motor

A continuación, se detallan los procesos que se llevaron a cabo para realizar la fabricación de los componentes del motor.

1.3.1 Fabricación Bloque

El material del bloque es fundición grafito esferoidal, ha de tener una resistencia de tracción 500 N/mm^2 (UNE-EN 1563:2012 [13]). Esta exigencia viene impuesta por la rigidez que ha de conservar en todo momento, tal y como ya se indicó en el apartado 1.2.2

Para la fabricación del bloque se prepara la cantidad de materias primas necesarias en una zona cercana al horno, se tiene la precaución de desconectar el horno cada vez que vaya a adicionarse carga y que se abra el horno. Una vez fundida toda la carga (material para fundir) se sube la temperatura del horno a $1410 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ y se desescoria. Se toma la cuchara (recipiente utilizado para verter el material fundido en el molde) que estará protegida y se calienta hasta $750 \text{ }^\circ\text{C}$. Cuando la temperatura del caldo en el horno sea de $1410 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ se extrae con un cazo, protegido por pintura y se cuela sobre una coquilla de cobre. Se hacen dos probetas para análisis de composición química mediante espectrografía. El motivo de realizar dos probetas es comprobar los resultados. Caldera et al [14] comprobaron que piezas de igual composición de fundición esferoidal tienen diferente resiliencia dependiendo de su espesor, ésta disminuye a medida que disminuye su espesor.

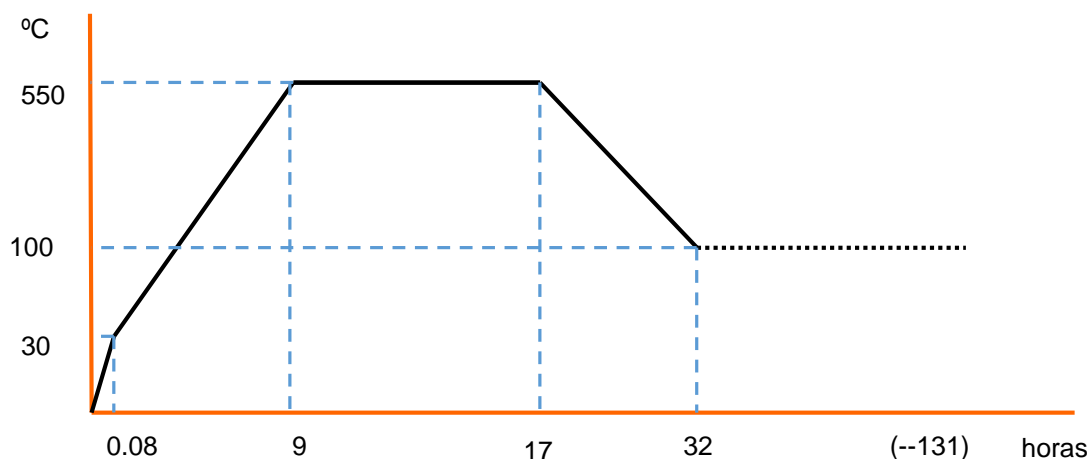
Se añaden las ferroaleaciones (FeSiMg) necesarias para que esas probetas tengan la composición necesaria para que el bloque pueda cumplir sus funciones, la cantidad de ferroaleaciones añadidas vendrá dada por el análisis anterior. La adición se realiza de la siguiente forma: se eleva la temperatura hasta $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ y se vuelve a analizar para comprobar si la composición es la

correcta. En el fondo de la cuchara colocaremos FeSiMg, una vez realizado esto se colocará la cuchara bajo la salida del producto fundido del horno y se procederá a inclinar el depósito que se ha usado para realizar la fusión de las materias primas con las ferroaleaciones, es decir, a la basculación del caldo.

Cuando se termina la basculación ocurre la reacción violenta a causa del tratamiento del Mg, en el momento que ésta ya se ha realizado se dirige la cuchara hacia el molde y se vuelve a medir la temperatura, cuando sea de 1440 °C se bascula hasta llenar la poza (lugar intermedio antes de llenar el molde); una vez llena ésta y con el caldo a la temperatura de 1380 ± 10 °C se abren las válvulas para permitir la entrada del caldo en el molde.

Después de 5 días se realizará el desmolde del bloque, se debe tener en cuenta que no se deberá realizar un enfriamiento menor a 90 horas. Una vez se comience el desmolde no se realizarán interrupciones para evitar tensiones internas en el material. El tratamiento de recocido, que se observa en la gráfica 1.2, se realizará de la siguiente forma:

- Se efectuará un tratamiento térmico del bloque y su barreta, en el horno de recocido para conseguir un alivio de tensiones.
- Subida de temperatura máxima de 50 °C/h hasta 550°C.
- Se mantienen 550 °C durante 8 horas.
- Se bajan 50 °C/h hasta 100 °C y el resto de bajada libre.



Gráfica 1.2. Gráfico °C-tiempo del tratamiento de recocido.

Una vez terminado se realizará un tratamiento para eliminar el óxido y los restos de arena. Este tratamiento se realizará con un chorreado de granalla a

alta presión para eliminar todo producto indeseable. Este rebabado y limpieza se harán teniendo en cuenta las distintas zonas del bastidor. Varela et al [15] estudiaron la influencia del tratamiento en la fundición esferoidal y su conclusión fue que a mayor dureza habrá menos riesgo de fallo por abrasión al aumentar su dureza, manteniéndose constante el coeficiente de fricción.

1.3.2 Fabricación Culata

La culata a analizar está fabricada con hierro fundido con grafito esferoidal. Su fijación al bloque se realiza mediante 4 pernos apretados a 1200 kg/cm² con un dispositivo hidráulico. La culata tiene las conducciones del agua perforadas en su parte inferior.

El inyector se encuentra situado en el centro tanto de la culata como el centro de la cámara de combustión. Todas sus conexiones con el circuito exterior de combustible deben estar perfectamente selladas para evitar contaminaciones del combustible o de otros fluidos que participan en el funcionamiento del motor.

Todas las conexiones de la culata con el resto de elementos de motor se realizan a través de cierres rápidos y enchufe. La culata queda protegida del exterior por la tapa del balancín.

Antes de empezar con la fabricación se prepara en la plataforma del horno la cantidad de materias primas necesarias. Una vez fundida toda la carga se debe subir el horno hasta una temperatura de 1410°C ± 10°C y desescoriar, es decir, eliminar los residuos, escombros o escorias, en definitiva, se procede a prescindir de los subproductos inútiles para el objetivo que queremos conseguir.

La cuchara que se va a utilizar hay que limpiarla, protegerla con un producto especial para evitar alteraciones durante el proceso y calentar su revestimiento hasta 750°C durante al menos 1 hora. Cuando la temperatura del caldo en el horno es de aproximadamente 1420 °C, se extrae con un cazo protegido con pintura y se realiza un colado sobre una coquilla de cobre. De este caldo se hará una probeta para su análisis en el espectrógrafo.

En este momento hay que añadir las ferroaleaciones. Una vez añadidas se elevará la temperatura hasta 1450 °C. Se lleva la cuchara a la zona del horno, se apoya y se pone en su alojamiento el porcentaje de FeSiMg adecuado, se

ubre con un troquelín. A continuación, se levanta la cuchara y se coloca en posición adecuada para la basculación del caldo.

Una vez terminada la basculación y la reacción nodulizante que sufre el caldo a consecuencia del tratamiento de Mg, necesario para la esferoidización del grafito, se extrae el caldo de la cuchara con un cazo limpio y protegido, y se coloca sobre la coquilla de cobre. En este momento también se realizan dos probetas para analizar la composición química del producto de la fundición.

Cuando la temperatura del caldo esté entre $1380\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$ se bascula sobre la poza de colada a la vez que se inocula, hasta llenar la poza o balsa. Cuando ya está la balsa llena se procede a levantar la válvula para que empiece a llenarse la pieza. Tras unos instantes el caldo comenzará a subir por los rebosaderos.

Para el desmolde de la culata se deberá esperar 2 días desde la colada, como mínimo. Para evitar tensiones internas por un enfriamiento no uniforme, el desmolde, de cada culata, se realizará sin interrupciones una vez que se empiece. En la Imagen 1.4. se muestra el estado de la culata cuando finaliza el proceso de desmolde y antes de empezar a realizar su acabado final.

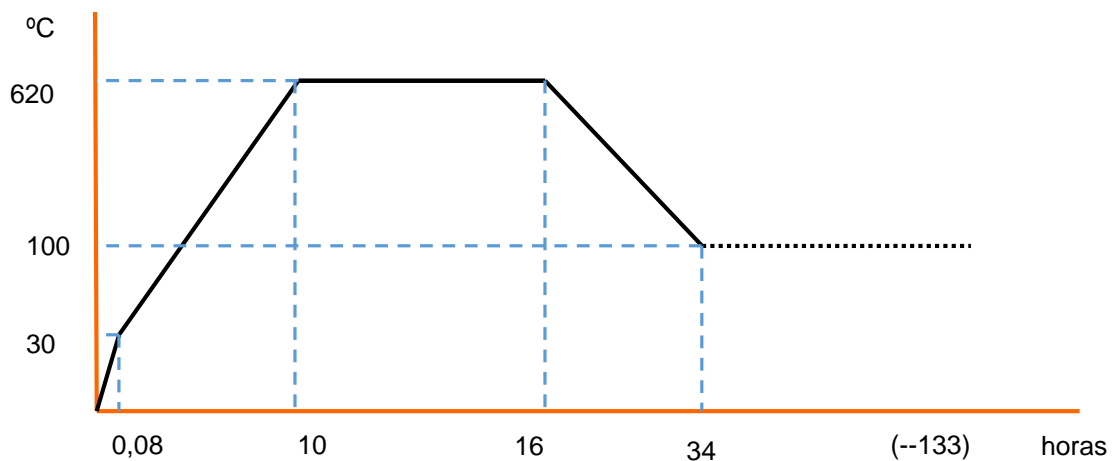


Imagen 1.4. Culata después de desmoldar.

Para realizar el recocido se efectuará un tratamiento térmico de la culata y sus barretas, en el horno de recocido, para conseguir un alivio de tensiones. La gráfica 1.3 se observa el proceso de subida, mantenimiento y bajada de temperatura. La forma de conseguirlo será como sigue:

- Subida máx. 60°C/h hasta 620 °C en 10 h.
- Permanencia de esta temperatura, durante 6 h.
- Bajada de máx. 30°C cada hora hasta 100 °C. Resto libre
- Temperatura de seguridad 620 °C + 35°C.
- Enfriamiento en aire en reposo.

En este caso la temperatura es mayor que la del bloque porque la culata está sometida a mayores sollicitaciones de presión y temperatura, debido a que aloja a las válvulas y al inyector, asimismo que por la parte inferior debe soportar las altas presiones y temperaturas derivadas de la combustión.



Gráfica 1.3. Gráfico °C-tiempo del tratamiento de recocido de la culata.

El tratamiento térmico de recocido se utiliza para eliminar las alteraciones microestructurales y para disolver los carburos, de esta forma se consiguen unas mejores propiedades mecánicas y mejor resistencia a la corrosión [16].

1.3.3 Fabricación de la camisa

La camisa está compuesta por fundición gris, se fabrica por moldeo. El resultado de la fabricación debe cumplir los parámetros establecidos por la UNE-EN 1561:2012 [17]. Picasso et al [18] condiciona los componentes al porcentaje de fósforo que tenga la fundición, por ejemplo, si hubiese un gran componente de este elemento habría un gran porcentaje de steadita.

Antes de empezar con el proceso de fabricación hay que recubrir el macho (es la pieza utilizada cuando se quieren fabricar piezas huecas para evitar que el caldo se solidifique en una zona en la que debe haber una oquedad) con tela de arpillera para absorber la contracción que se produce cuando se fragua la arena. La temperatura de la colada estará sobre $1405^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$. El desmolde se hará una vez pasen 5 días desde la colada y el desmolde se producirá sin interrupciones una vez se empiece.

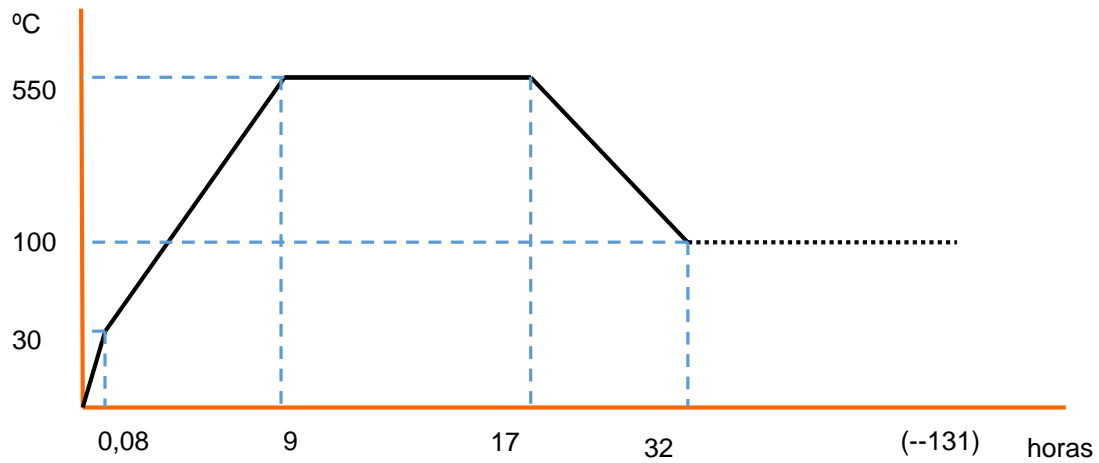
Se preparan 10 toneladas de caldo y se funde. Una vez fundida toda la carga y el horno a 1410°C se desescoria y se toma una muestra, mientras se realiza el análisis hay que mantener la temperatura de la carga.

Se conecta el calentador de cucharas. La cuchara deberá permanecer al menos una hora en el calentador antes de la colada. En caso de que haya que corregir el porcentaje de carbono o fósforo se deberá subir la temperatura hasta 1480°C . Esto es imprescindible para que la temperatura y agitación del baño puedan disolverlos. En este momento se toma una segunda muestra para comprobar si la concentración es la adecuada.

Una vez que la composición es adecuada se elevan la temperatura hasta 1440°C y se mantiene. Se coloca la báscula y se saca la cuchara del calentador. Se bascula del horno 5 toneladas de caldo, inoculando en la cuchara y se toma una muestra. Se toma la temperatura de la cuchara junto al horno, que será de entre 1405 a 1415°C . Se llena la poza con 1100 kg de caldo. El caldo deberá permanecer en la poza el mínimo tiempo posible para evitar cualquier fuga.

El tratamiento de recocido comprende las siguientes etapas:

- Se efectuará un tratamiento térmico de la camisa y su barreta, en el horno de recocido para conseguir un alivio de tensiones.
- Temperatura de seguridad 585°C .
- Subida de temperatura máxima $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ hasta 550°C .
- Mantener la temperatura de 550°C durante 6 h.
- La bajada de temperatura será de $25^{\circ}\text{C}/\text{h}$ máxima.



Gráfica 1.4. Gráfico °C-tiempo del tratamiento recocido de la camisa

Se chorreará para eliminar el óxido y los restos de arena. Una vez acabada esta operación se rebabará la pieza. Se eliminan todas las rebabas, greñas, metalizados y restos de arena que tenga la pieza mediante martillo neumático, amolado y repasado con turbina.

Bermúdez et al [19] demostraron la posibilidad de realizar una simulación para saber cómo sería la composición microestructural de la fundición gris.

1.4 Bibliografía

- [1] Lester, D. T., & Ostrowski, D. (2010). Turbocharged engine cylinder head internal cooling. U.S. Patent No. 7,784,442. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [2] Okuno, Y., Yoshijima, K., Endou, T., & Hida, T. (2011). Cylinder head gasket and engine. U.S. Patent No. 8,042,815. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [3] Matsushita, Y., Kobayashi, S., Hirayama, S., Abe, T., & Takeda, N. (2010). Metal gasket for cylinder head. U.S. Patent No. 7,703,775. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [4] Li, N., Yang, J., Zhou, R., & Wang, Q. (2014). Knock detection in spark ignition engines using a nonlinear wavelet transform of the engine cylinder head vibration signal. *Measurement Science and Technology*, 25(11), 115002.
- [5] Etefagh, M. M., Sadeghi, M. H., Pirouzpanah, V., & Tash, H. A. (2008). Knock detection in spark ignition engines by vibration analysis of cylinder block: A parametric modeling approach. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 22(6), 1495-1514.
- [6] Wang, J., & Wu, J. (2015). Investigation of a mixed effect absorption chiller powered by jacket water and exhaust gas waste heat of internal combustion engine. *International Journal of Refrigeration*, 50, 193-206.
- [7] Ma, H., Zhang, Z., Xue, C., & Huang, Y. (2015). PIV measurements of coolant flow field in a diesel engine cylinder head. *Journal of Thermal Science*, 24(2), 179-184.
- [8] Mikalsen, R., & Roskilly, A. P. (2007). A review of free-piston engine history and applications. *Applied Thermal Engineering*, 27(14), 2339-2352.
- [9] Olander, P., & Jacobson, S. (2015). Scuffing resistance testing of piston ring materials for marine two-stroke diesel engines and mapping of the operating mechanisms. *Wear*, 330, 42-48.
- [10] Olander, P., Eskildsen, S., Fogh, W., Hollman, P., & Jacobson, S. (2014). Testing scuffing resistance of materials for marine 2-stroke engines: Difficulties with lab scale testing of a complex phenomenon. In 16th Nordic Symposium on Tribology, Aarhus, June 10-13, 2014.

- [11] Sigurdsson, E., Ingvorsen, K. M., Jensen, M. V., Mayer, S., Matlok, S., & Walther, J. H. (2014). Numerical analysis of the scavenge flow and convective heat transfer in large two-stroke marine diesel engines. *Applied Energy*, 123, 37-46.
- [12] Torims, T., Pikurs, G., Ratkus, A., Logins, A., Vilcans, J., & Sklariks, S. (2015). Development of Technological Equipment to Laboratory Test In-situ Laser Cladding for Marine Engine Crankshaft Renovation. *Procedia Engineering*, 100, 559-568.
- [13] UNE-EN 1563:2012. Fundición de grafito esferoidal.
- [14] Caldera, M., Massone, J., Boeri, R., & Sikora, J. (2004). Ensayo de Impacto de Piezas de Fundición Esferoidal de Pequeño Espesor. *Revista Matéria*, 9(2), 66-72.
- [15] Varela, A., García, A., Zaragoza, S., Mier, J. L., Barbadillo, F., & García, L. (2008). Influencia de los tratamientos térmicos en el comportamiento frente al desgaste por abrasión de una fundición de grafito esferoidal obtenida mediante adición de boro. *Revista de metalurgia*, 44(4), 293-298.
- [16] Molera Solá, P. (1991). *Tratamientos térmicos de los metales (Vol. 51)*. Marcombo.
- [17] UNE-EN 1561:2012. Fundición gris.
- [18] Picasso, A., Romero, R., & Cuniberti, A. (2000). Identificación y caracterización de un acero y una fundición utilizados en la construcción de puentes ferroviarios a fines del siglo pasado.
- [19] Bermúdez, R., Schulz, B., & Celentano, D. (2002). Estudio Térmico-Microestructural de la Solidificación de Fundiciones Grises. In *Anales de CONAMET/SAM-SIMPOSIO MATERIA*.

Capítulo 2. Materiales y métodos experimentales

Capítulo 2: Materiales y métodos experimentales

2.1 Introducción

Tal y como se ha expuesto en el capítulo precedente en el proceso de fabricación de una pieza se han de realizar las pruebas necesarias para evaluar la constitución de la misma. Cuando se realiza el molde de la pieza se realiza teniendo en cuenta que hay que tener espacio para poder examinar dos probetas, es decir, las probetas se obtienen de la propia pieza al desmoldarse. La probeta así obtenida se denomina muestra adjunta. En la pieza hay varias zonas reservadas para la obtención de muestras, en el momento de la elección se debe buscar la que tenga una zona más uniforme y se evitará escoger la parte superior, debido a que en esta parte se concentran elementos de desecho de la fundición.

A estas probetas se le harán los ensayos de:

- Tracción.
- Dureza.
- Análisis químico

El ensayo de tracción consiste en someter a la probeta a una carga uniaxial y creciente en un tiempo determinado hasta llegar al momento en el que se produzca la rotura. Los datos registrados en este ensayo serán:

- Carga aplicada.
- Tiempo de aplicación.
- Alargamiento de la pieza.
- Disminución del diámetro en la zona de rotura.

Con este ensayo se verá si las piezas son resistentes a las fuerzas que existen en el interior del motor como consecuencia de su trabajo normal. A partir de los datos registrados se realizará una curva en el que se observan magnitudes mecánicas:

- Módulo de Young.
- Límite elástico.
- Resistencia.
- Deformación a la tracción.

2.2 Ensayo de tracción

El ensayo de tracción consiste en someter a la probeta a una carga uniaxial y creciente en un tiempo determinado hasta llegar al momento en el que se produzca la rotura. Los datos registrados en este ensayo serán:

- Carga aplicada.
- Tiempo de aplicación.
- Alargamiento de la pieza.
- Disminución del diámetro en la zona de rotura.

Con este ensayo se verá si las piezas son resistentes a las fuerzas que existen en el interior del motor como consecuencia de su trabajo normal. A partir de los datos registrados se realizará una curva en el que se observan magnitudes mecánicas [1]:

- Módulo de Young.
- Límite elástico.
- Resistencia.
- Deformación a la tracción.

Este ensayo es el más usado [2] para evaluar materiales metálicos debido a:

- Facilidad de preparación de probetas.
- Facilidad en la sujeción de la pieza y asegura que solo existe la carga uniaxial aplicada por la máquina de tracción.
- Toleran grandes deformaciones antes de romperse.

Las probetas para un ensayo de tracción pueden tener diferentes secciones (circular, cuadrangular o rectangular) pero deben mantener la relación entre sección y longitud establecida en la norma que aplique para cada material. En la máquina de ensayo una de las mordazas estará fija mientras que la otra se moverá, la mordaza móvil puede desplazarse en ambas direcciones y así podrá alargar o contraer la probeta a la velocidad determinada.

En la figura 2.1 se puede ver el esquema de una probeta según la norma UNE-EN 1563:2012 [3].

Como se puede observar la marca r es un bisel realizado de tal forma que haya una transición entre la parte de menor diámetro (L_0) y la parte de mayor

diámetro (L_R). La parte de mayor diámetro se utiliza para el agarre de la pieza en la máquina.

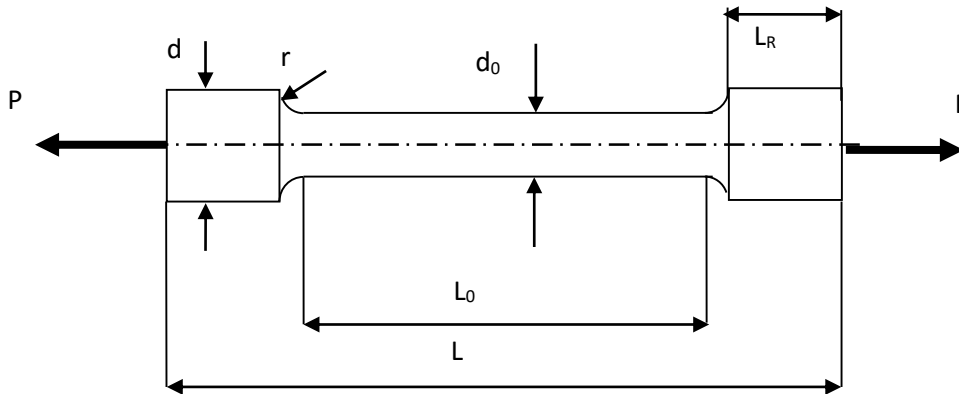


Fig. 2.1. Diagrama de mecanizado

| d (mm) | L_{ep} (mm) | L_0 (mm) |
|--------|---------------|------------|
| 14 | 70 | 84 |

Tabla 2.1. Medidas de la probeta de tracción.

d: diámetro de la parte calibrada de la probeta.

L_{ep} : longitud inicial entre puntos.

L_0 : longitud calibrada $L_0 > L_{ep}$.

L_R : longitud de la zona de amarre

En la imagen 2.2. se muestra la verdadera probeta en la que podemos apreciar:

1. Zona de amarre.
2. Zona calibrada (parte intermedia).
3. Longitud entre puntos. Es la distancia entre las marcas realizadas en la zona negra, se realizan dos marcas a distancia de 70 mm.



Imagen 2.1. Probeta preparada para el ensayo.

Las tres marcas están realizadas con una medida de 70 mm entre ellas. Esta medida es muy importante porque es la que se utilizará después para comprar el alargamiento que se ha producido durante el ensayo de tracción. Esta medida viene determinada en la norma UNE-EN 1563:2012 [3], en la que $L_{ep}=5xd$. El diámetro de la probeta es de 14 mm, debido a ello L_0 tendrá que ser 70 mm.

El esquema anterior es el realizado para fundición esferoidal (culata y bloque) y la norma que le rige es la UNE-EN 1563:2012 [3]. Para el caso de fundición gris (camisa) la norma que se ha usado para fabricar la probeta es la UNE-EN 1561:2012 [4].



Imagen 2.2. Probeta de la camisa.

Este ensayo se realizará de acuerdo con la Norma que describe los ensayos de tracción (UNE-EN 10002-1:2015) [5]. Este ensayo mide la resistencia del material de la camisa frente a una fuerza estática o aplicada lentamente. Se utiliza una norma diferente que en la culata o en el bastidor debido a que la camisa tiene un material diferente.

De acuerdo con la norma UNE-EN 1561:2012 [4] se preparará la probeta de acuerdo a la Norma UNE-EN 10002-1:2015 [5], utilizando una probeta que se ajuste a lo indicado en la imagen 2.2. Las medidas de la probeta deben estar conformes con las indicadas en la tabla 2.2. Las cabezas de amarre pueden ser roscadas o lisas, dependiendo de los dispositivos de sujeción. En el caso que nos ocupa la cabeza de amarra de la probeta será lisa.

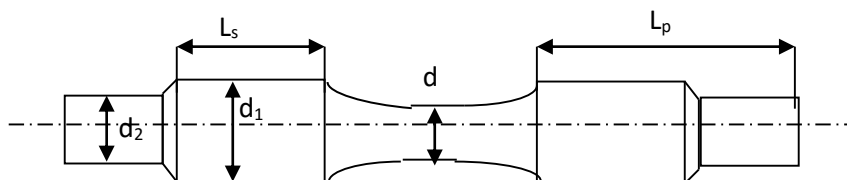


Fig. 2.2. Esquema de la probeta de la camisa.

| Diámetro d | Tipo de rosca para probetas roscadas | Longitud de rosca L_s | Diámetro de los extremos cilíndricos d_1 | Longitud de rosca de la probeta A | Longitud de la parte calibrada de la probeta B L_c |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------------|--|
| $6 \pm 0,1$ | M10 | 13 | 8 | 46 | 18 |
| $8 \pm 0,1$ | M12 | 16 | 10 | 53 | 24 |
| $10 \pm 0,1$ | M16 | 20 | 12 | 63 | 30 |
| $12,5 \pm 0,1$ | M20 | 24 | 15 | 73 | 36,5 |
| $16 \pm 0,1$ | M24 | 30 | 20 | 87 | 48 |
| $20 \pm 0,1$ | M30 | 36 | 23 | 102 | 60 |
| $25 \pm 0,1$ | M36 | 44 | 30 | 119 | 75 |
| $32 \pm 0,1$ | M45 | 55 | 40 | 143 | 96 |

Tabla 2.2. Medida de la probeta.



Imagen 2.3. Máquina de tracción.

En la imagen 2.3 se observa la máquina elegida para realizar el ensayo con la probeta y el extensómetro que medirá el alargamiento. La pieza debe estar bien asegurada en la máquina para evitar accidentes. La parte encargada de ejercer la fuerza será la superior que además será ésta la que tenga el movimiento, mientras que la parte inferior estará en posición estática y asegurando la posición de la pieza.

La máquina de tracción mostrada en la imagen 2.3 consta de las siguientes características técnicas:

- Marca MFL/IBERTEST
- 400 kN.
- Modelo UPD-40.

El extensómetro es del Modelo MFA-2

Antes de realizar cualquier ensayo es de vital importancia asegurarse del buen estado de la máquina, tanto para la seguridad de las personas como para la fiabilidad de los resultados por ella obtenidos. Es por ello que la máquina debe estar calibrada periódicamente. Para la realización de la calibración se usa un método de comparación que está acorde con la norma UNE-EN-7500-1:2006 [10].

En la tabla 2.3 se muestran los dispositivos usados como patrones de calibración y sus características:

| | | | | | | | |
|-----------|---------------|------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| 92 | H.B.M. | U2A | TRACCIÓN | UNE-EN-ISO 376:2011 | 1,0 0,5 | 10-200 30-200 | 0,24000 0,12000 |
| 1 | H.B.M. | Z4 | TRACCIÓN | UNE-EN-ISO 376:2011 | 0,5 | 60-600 | 0,06300 |

Tabla 2.3. Equipos de medida utilizados para la calibración.

- H.B.M. U2A es la célula de carga, ésta se utiliza para poder medir la tensión aplicada y comprobar si la máquina marca exactamente la misma.

- H.B.M. ZA es el transductor de fuerza. Se puede usar tanto para calibrar la máquina en extensión como en tracción y para realizar medidas comparativas de fuerza.

Para calcular la incertidumbre expandida se utiliza el método que consiste en multiplicar la incertidumbre típica de medición por el factor de cobertura $K=2$, que corresponde a la probabilidad del 95%. El documento usado para realizar la incertidumbre típica de medida ha sido el EA-4/02.

El ajuste y calibración se realiza siguiendo el mismo método para el que está pensada la máquina, es decir, a tracción. En el proceso se colocan unos transductores *patrón* que serán los que nos envíen las señales reales para así poder comparar con los valores que nos ofrece la máquina.

A continuación, en la Tabla 2.4 se muestran los valores obtenidos durante dicho proceso.

| Lectura Máquina | Lectura en equipo patrón de medida $F(kN)$ | | | Valor medio | Exactitud (%) | Repetib. (%) |
|------------------------|--|---------|---------|--------------------|----------------------|---------------------|
| F_j (kN) | Serie 1 | Serie 2 | Serie 3 | F_m | q | b |
| 40,00 | 40,151 | 40,144 | 40,126 | 40,140 | -0,3 | 0,1 |
| 80,00 | 80,221 | 80,146 | 80,133 | 80,167 | -0,2 | 0,1 |
| 160,00 | 160,237 | 160,167 | 160,124 | 160,176 | -0,1 | 0,1 |
| 240,00 | 240,295 | 240,207 | 240,125 | 240,209 | -0,1 | 0,1 |
| 320,00 | 320,388 | 320,288 | 320,186 | 320,287 | -0,1 | 0,1 |
| 400,00 | 400,517 | 400,387 | 400,277 | 400,394 | -0,1 | 0,1 |

Tabla 2.4. Valores obtenidos durante la calibración.

| Margen calibrado | q Máx. (%) | f₀ (%) | b Máx. (%) | a (%) | Clase final | U (%) |
|-----------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|------------------|------------------------|--------------|
| 40-400 kN | 0,3 | 0,00 | 0,1 | 0,03 | 0,5 | 0,5 |
| 20-200 kN | 0,2 | 0,00 | 0,3 | 0,05 | 1,0 | 1,0 |
| 40-200 kN | 0,3 | 0,00 | 0,1 | 0,03 | 0,5 | 0,5 |

Tabla. 2.5. Cuadro de resultados de la calibración.

Definiciones

F: Fuerza real. La indicada en el equipo de calibración.

F_j: Fuerza leída. La indicada por el sistema de medida.

F_m: Fuerza media. Media aritmética de las series de medida.

r: resolución de la escala. Mínimo incremento que se puede apreciar en el indicador de fuerza.

b: repetibilidad. $([F_{\max}-F_{\min}]/F) \times 100$.

q: exactitud. $([F_j-F_m]/F_m) \times 100$.

f₀: error relativo de 0. $(r/\text{fin de escala}) \times 100$.

a: resolución relativa. $(r/\text{margen inferior calibrado}) \times 100$.

2.3 Dureza

El ensayo de dureza es un ensayo fácil de realizar y de uso extendido. Consiste en realizar una pequeña huella con un penetrador presionando contra la superficie a evaluar y con una carga definida, esto realiza una huella que es analizada por su tamaño [2]. La dureza es fuerza aplicada dividida por el área de toda la huella dejada por el penetrador. El penetrador puede ser semiesférico, cónico o piramidal. Es un método rápido de obtener datos para la investigación de los cambios de resistencia mecánica, por ejemplo, durante tratamientos térmicos. El ensayo es de alto rendimiento ya que no destruye la muestra y particularmente útil para evaluar las propiedades de los diferentes componentes microestructurales del material [11].

Este ensayo no requiere preparación de la superficie, salvo la limpieza. Su duración es breve y el durómetro no es caro.

La principal desventaja de este ensayo es que no proporciona una información completa, sino parcial, así mismo, la deformación producida se realiza mediante un esfuerzo multiaxial y ésta es permanente [2]. La dureza está relacionada con otras propiedades mecánicas del material, por ejemplo, para materiales dúctiles se puede establecer una relación entre la dureza y las propiedades de tracción.

El ensayo de dureza se realizará siguiendo las especificaciones de las normas UNE-EN ISO 6506-1:2015 [8] y UNE-EN ISO 6506-2:2015 [9]. Cuando el ensayo de tracción ha resultado óptimo se continúa con el proceso de verificar que la pieza cumpla con todas sus características. El siguiente paso es el durómetro. El aparato usado se puede ver en la imagen 2.4 El método a seguir es el método Brinell. El durómetro es Modelo rb12.



Imagen 2.4. Durómetro.

Para medir la dureza de una pieza debemos aplicar una fuerza perpendicularmente con un penetrador en su superficie durante una duración de 10 a 15 segundos, una vez cese la fuerza del penetrador hay que medir el diámetro de la huella que ha dejado dicho penetrador. Durante la aplicación de la fuerza aplicada por el penetrador, la probeta ha de permanecer estática, sin desplazamientos ni vibraciones [2].

2.4 Análisis químico

En este apartado se describirá el procedimiento para realizar el análisis químico de los diferentes elementos. En el análisis de la composición de muestras metalúrgicas, es muy popular por la posibilidad de utilizar muestreo directo y rápido en fase sólida [12].

Con objetivo de analizar el análisis químico de la probeta se utiliza un espectrógrafo.



Imagen 2.5. Espectrógrafo.

El espectrógrafo de la imagen 2.5 es el utilizado para caracterizar las diferentes composiciones de las probetas. Su principio de funcionamiento se basa en el análisis del espectro característico de cada elemento químico del material que compone la probeta al aplicar un haz de luz sobre ella. Los elementos tendrán una longitud de onda diferente lo que provoca que se refracten de diferente manera. Estas longitudes de onda serán medidas de forma separada.



Imagen 2.6. Probeta después de pasar por el espectrógrafo.

En la imagen 2.6 se puede observar la muestra con la huella dejada por el espectrógrafo después de haber realizado la prueba. Se observa que la huella que deja es parecida a una pequeña quemadura en la probeta.

Para determinar el contenido de carbono, se utiliza el determinador de carbono LECO C-200 (imagen 2.7).



Imagen 2.7. Determinador de carbono.

Este dispositivo mide el contenido de carbono a partir de unas muestras derivadas de la pieza original. Para realizar su función dispone de células infrarrojas que permiten la combustión de la muestra, analizando posteriormente la cantidad de CO_2 generada en el proceso. El CO_2 se transporta hasta un el elemento medidor, un detector de infrarrojos.

Por tanto, para determinar el porcentaje de carbono se han de extraer virutas de la probeta que ya utilizada en el espectrógrafo (imagen 2.8).



Imagen 2.8. Probeta tras obtención de virutas.

Estas virutas se colocan en un recipiente, crisol, y se pesan en una báscula de precisión imagen 2.9.

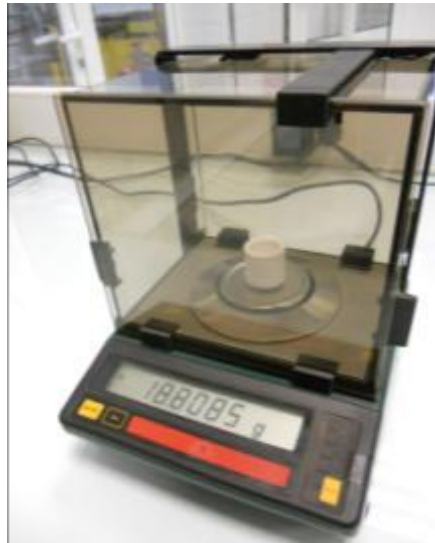


Imagen 2.9. Báscula de precisión.

Antes de realizar el ensayo se calibrará el dispositivo medidor mediante una sustancia patrón.

Una vez está preparada la muestra patrón se introduce en el determinador de carbono para calibrarlo. Este determinador es un horno de combustión inductivo automático de alta frecuencia que mide el contenido de carbono. Este equipo permite hacer de manera precisa determinaciones de contenido de carbono en metales y ferroaleaciones por lo que es de gran ayuda para evaluar la probeta asegurando que las cargas metálicas en su horno están dentro de los límites establecidos.

2.5 Análisis metalográfico

Después de la determinación de la composición química el siguiente paso es el examen metalográfico de la probeta, para ello se deberá preparar la muestra para su análisis. El análisis metalográfico produce material de valor científico y tecnológico [13].

Para determinar el tipo de grafito y el tamaño se fabrica una pequeña probeta de la pieza probada en el ensayo de tracción para verla al microscopio,

tal y como muestra la imagen 2.10. Es el análisis metalográfico el que revela la microestructura de las probetas [14].

El análisis metalográfico se realiza con el objetivo de obtener las características principales de las fundiciones en lo que respecta a la microestructura y morfología del material ya sea la de los grafitos o fases presentes (ferrita y perlita), tamaño, tipo o distribución [15]



Imagen 2.10. Probeta para el microscopio.

Para preparar así la probeta se utilizaron los siguientes materiales:

- Cortadora Struers Unitom-2 (imagen 2.11).
- Rectificadora Impar PLB-175 (imagen 2.12).
- Lijadora tipo HL±350-2 (imagen 2.13).
- Empastilladora Buehler LTD.
- Resina fenólica.
- Pulidora Motopol 2000. Modelo 92-2800 (imagen 2.14).
- Pasta de diamante.
- Nital.
- Secador.
- Microscopio (Imagen 2.15).

Se cortará en sección un trozo de la pieza que se quiere determinar la estructura en el núcleo.



Imagen 2.11. Máquina cortadora.

Una vez cortada la pieza se rectificará la superficie para eliminar las irregularidades que presenta la misma. Tanto en la cortadora como en la rectificadora se trabajará con líquido refrigerante para evitar que se queme la superficie que se quiere comprobar, porque si la superficie se quema variará el resultado del ensayo.



Imagen 2.12 Rectificadora.

Para obtener un mejor acabado superficial se lijará la pieza con las lijas de distinto grano, primero con una lija de grano grueso y seguidamente con una lija de grano fino.



Imagen 2.13 Máquinas lijadoras.

Cuando se haya lijado la pieza se debe empastillar con resina fenólica. Tal y como se señaló y mostró anteriormente en la imagen 2.9.

El siguiente paso es pulir la pieza empastillada. Para ello se utilizan cuatro discos con distintos tamaños de grano. Primero se lija con el de 240, después con el de 400 y con el de 600. Estos tres discos siempre se usarán refrigerados por agua. Es muy importante que en el proceso de lijado no se pierda el paralelismo de las dos caras. Por último, la pieza se pule con el disco de paño utilizando líquido de pasta de diamante base agua, hasta que la superficie queda como un espejo.



Imagen 2.14. Máquina pulidora.

Se somete a la pieza empastillada a un ataque químico con Nital al 2% (ácido nítrico con alcohol) durante dos minutos. Una vez transformada la superficie se lavará con abundante agua y finalmente con alcohol. Con el

secador se dejará la superficie lisa para mirar con el microscopio a 100 y a 400 aumentos.



Imagen 2.15. Microscopio.

Una vez analizada la probeta al microscopio se determina el tipo de grafito y el tamaño del grafito según la norma UNE-EN-945-1:2012 [7]. Esta norma establece la designación de la microestructura del grafito en la fundición. Al examinar al microscopio las aleaciones de hierro-carbono se pueden clasificar por:

- a) Su forma.
- b) Su distribución.
- c) Su medida.

La muestra debe ser pulida para que al observarla al microscopio pueda ser examinada en su totalidad.

2.6 Bibliografía

- [1] Cintas J., Cuevas F.G. y Montes J. M. *Ciencia e Ingeniería de los materiales*. Editorial Paraninfo. 2014.
- [2] Barroso Herrero, S. e Ibáñez Ulargui, J. *Introducción al conocimiento de los materiales*. Cuadernos de la UNED 2002.
- [3] UNE-EN 1563:2012. Fundición de grafito esferoidal.
- [4] UNE-EN 1561:2012. Fundición gris.
- [5] UNE-EN 10002-1:2015. Materiales metálicos. Ensayos de tracción. Método de ensayo a temperatura ambiente.
- [6] UNE-EN 1560:2011. Sistemas de designación para fundición de hierro. Designación simbólica y numérica.
- [7] UNE-EN 945-1:2012. Designación de la microestructura de la fundición de hierro. Parte 1: Clasificación del grafito por análisis visual.
- [8] UNE-EN ISO 6506-1:2015. Materiales metálicos. Ensayo de dureza Brinell. Parte 1: Método de ensayo.
- [9] UNE-EN ISO 6506-2:2015. Materiales metálicos. Ensayo de dureza Brinell. Parte 2: Verificación y calibración de las máquinas de ensayo.
- [10] UNE-EN-ISO 7500:2006 Materiales metálicos. Verificación de máquinas de ensayos uniaxiales estáticos. Parte 1: Máquinas de ensayo de tracción/compresión. Verificación y calibración del sistema de medida de fuerza.
- [11] Santos, E., Rojas, O., & Rosales, V. (2001). Acerca del ensayo de dureza. *Industrial Data*, 4(2), 73-80.
- [12] Jaimes, E., & Cabanzo, R. (2006). Caracterización espectroscópica de aceros mediante la técnica plasma inducido por láser (LIBS). *Revista Colombiana de Física*, 38(2), 922.
- [13] Miranda, P. E. V. D. (2015). Matter's Art and Art's Matter. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 20(1), I-II.

- [14] Robledo, J. D. M., Gómez, J. I. G., & Chavarría, E. I. M. (2015). Conformabilidad de láminas de acero AISI/SAE 1006 utilizadas para estampado/embutición en el Valle de Aburrá. *Scientia et Technica*, 20(1), 20-25.
- [15] León, R. A. G., Pérez, M. A. A., & Solano, E. F. (2015). Análisis del comportamiento de los frenos de disco de los vehículos a partir de la aceleración del proceso de corrosión. *Tecnura: Tecnología y Cultura Afirmando el Conocimiento*, 19(45), 53-64.

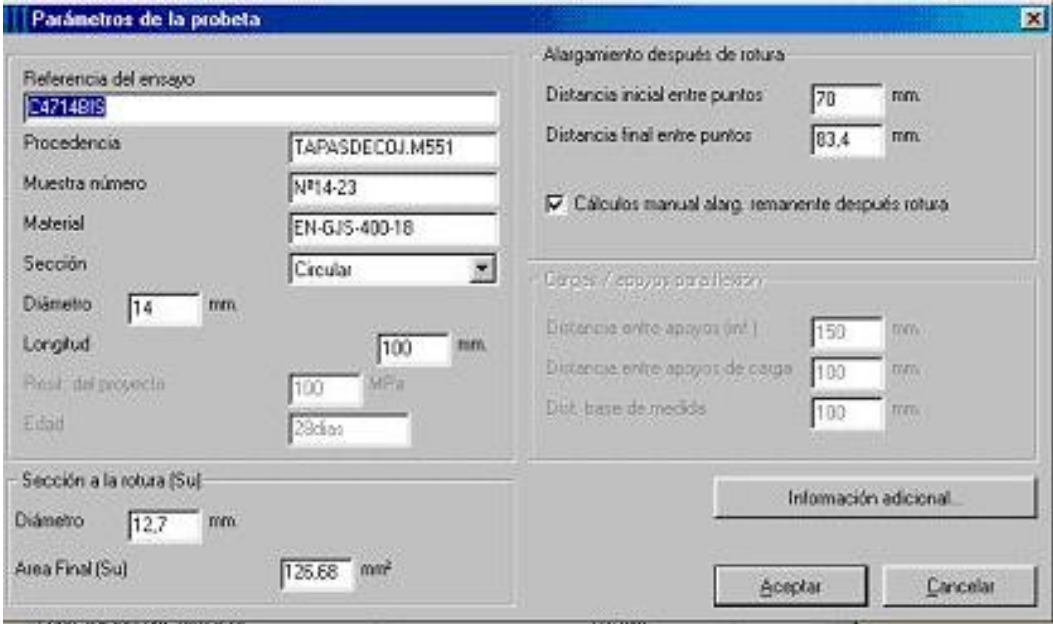
Capítulo 3. Resultados y discusión

Capítulo 3: Resultados y discusión

3.1 Aspectos básicos de la técnica

Previamente al proceso experimental propiamente dicho se comprueba el correcto funcionamiento del equipo de medida y su correspondiente calibración. Posteriormente se introducen los parámetros requeridos para la realización del ensayo tal y como se muestra en la figura 3.1. Estos datos determinarán los parámetros con los que funcionará la máquina de prueba y será la información que tendrá la máquina sobre la probeta a ensayar. En esta pantalla podemos observar:

- Referencia del ensayo.
- Procedencia de la pieza (fin para el que va a ser utilizada).
- Su número de referencia (número de muestra).
- Tipo de material.
- Tipo de sección.
- Medidas (diámetro, longitud y distancia inicial entre puntos).



Parámetros de la probeta

| | | | |
|--------------------------|------------------------|---|---------|
| Referencia del ensayo | C4714815 | Alargamiento después de rotura | |
| Procedencia | TAPASDECOJ.M551 | Distancia inicial entre puntos | 70 mm |
| Muestra número | Nº14-23 | Distancia final entre puntos | 83,4 mm |
| Material | EN-GJS-400-18 | <input checked="" type="checkbox"/> Cálculos manual alarg. remanente después rotura | |
| Sección | Circular | Datos / apoyos para flexión | |
| Diámetro | 14 mm | Distancia entre apoyos (inf.) | 150 mm |
| Longitud | 100 mm | Distancia entre apoyos de carga | 100 mm |
| Presión del proyecto | 100 MPa | Dist. base de medida | 100 mm |
| Edad | 23 días | Información adicional... | |
| Sección a la rotura (Su) | | Aceptar | |
| Diámetro | 12,7 mm | Cancelar | |
| Área Final (Su) | 125,68 mm ² | | |

Figura 3.1. Captura de pantalla de introducción de datos.

Durante la colocación de la probeta en la máquina se ha de ser preciso y cuidadoso para no variar las marcas realizadas que serán la referencia de la medida inicial y final de la zona en estudio. La figura 3.2 se muestra la pantalla

inicial correspondiente a ensayos de tracción de acuerdo a la norma UNE-EN 1563 [1]. En ella se puede ver:

- Norma a seguir durante el ensayo.
- Tipo de ensayo.
- Modo de control.
- Velocidad de subida de la fuerza.
- Temperatura a realizar el ensayo.
- Escala a la que saldrá el gráfico.

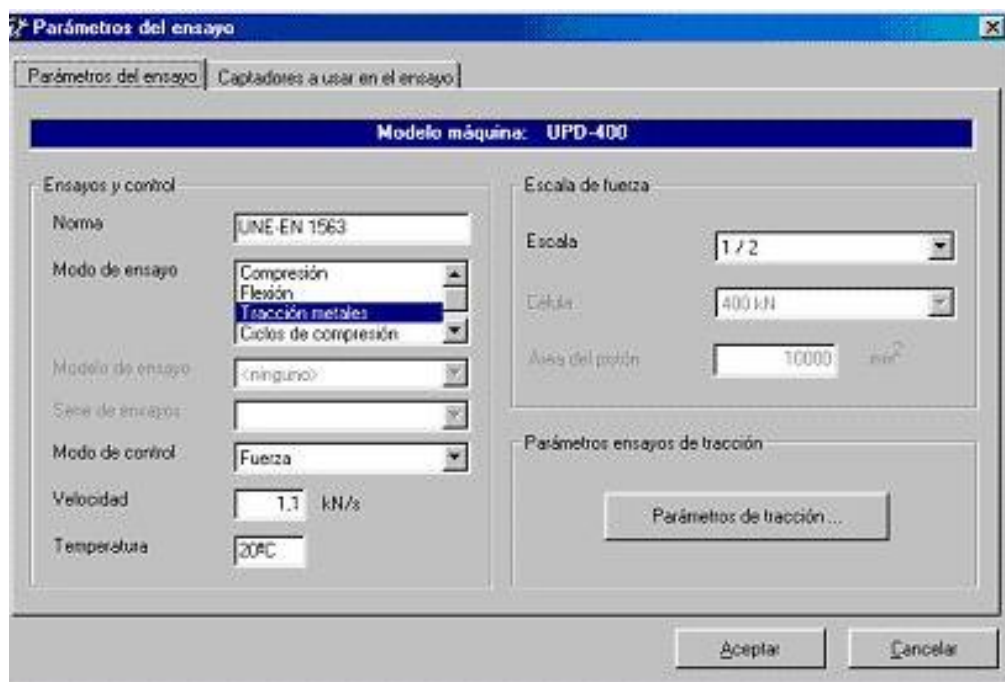


Figura 3.2. Captura de pantalla de parámetros de ensayo.

El siguiente paso será poner en marcha el extensómetro para poder fijar los parámetros a controlar. En la figura 3.3 se observa la pantalla para introducir los datos del ensayo, en ella podemos ver:

- Límite elástico en porcentaje.
- Límite extensión en porcentaje.
- Ajuste de la recta de la deformación (inferior y superior).
- Velocidad de aplicación de la fuerza después del límite elástico.



Figura 3.3. Captura de pantalla parámetros de ensayo límite elástico y extensión.

En el momento que todos los parámetros están correctamente introducidos y la probeta adecuadamente fijada (y con seguridad) en la máquina se empieza con el ensayo de tracción. Para ello se enciende el programa para realizar el proceso. En ese momento la máquina empieza a ejercer una fuerza vertical y hacia arriba en la probeta, que ocasiona que la probeta se alargue y estire hasta alcanzar y rebasar su límite elástico, es entonces cuando se rompe. En este momento se retira la probeta de la máquina y se observa su estado:

- Se unen los dos trozos en su punto de rotura.
- Se mide la zona calibrada y se observa el valor de alargamiento sufrido.
- Se mide el diámetro en la zona de rotura, así como en las zonas adyacentes.



Imagen 3.1. Probeta después del ensayo de tracción.



Imagen 3.2. Vista de la parte de rotura de la probeta anterior.

La imagen 3.1 muestra el estado final de la probeta y la disminución de diámetro en la parte central y la zona de rotura de la misma. Una vez realizadas las medidas en la probeta se introducen los datos obtenidos en el programa y se procede al análisis de los datos obtenidos.

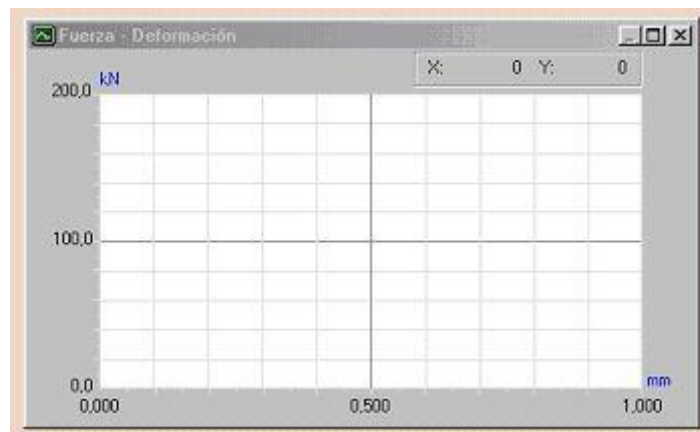


Figura 3.4. Captura de imagen del gráfico del ensayo antes de la introducción de los datos obtenidos.

Es importante ver el estado interno de la pieza después de la rotura, es por ello que en la imagen 3.2 podemos ver que en el interior de la probeta la fundición es homogénea y que no se observan indicios que puedan llevar a pensar que hay falta de fundición en ella. No se observan residuos sólidos ni

defectos en la fundición. También se aprecia que tiene una zona plástica relativamente pequeña.

3.2 Resultados bloque

El bloque elegido pertenece a un motor de cuatro tiempos, de 16 cilindros y 7680 kW. Este tiempo de motor es utilizado tanto para la generación de energía eléctrica (en instalaciones en tierra como navales) como para la propulsión de barcos.

El material utilizado en el bastidor es una fundición EN-GJS-500-7U. El plan de ensayo para el bloque será el siguiente:

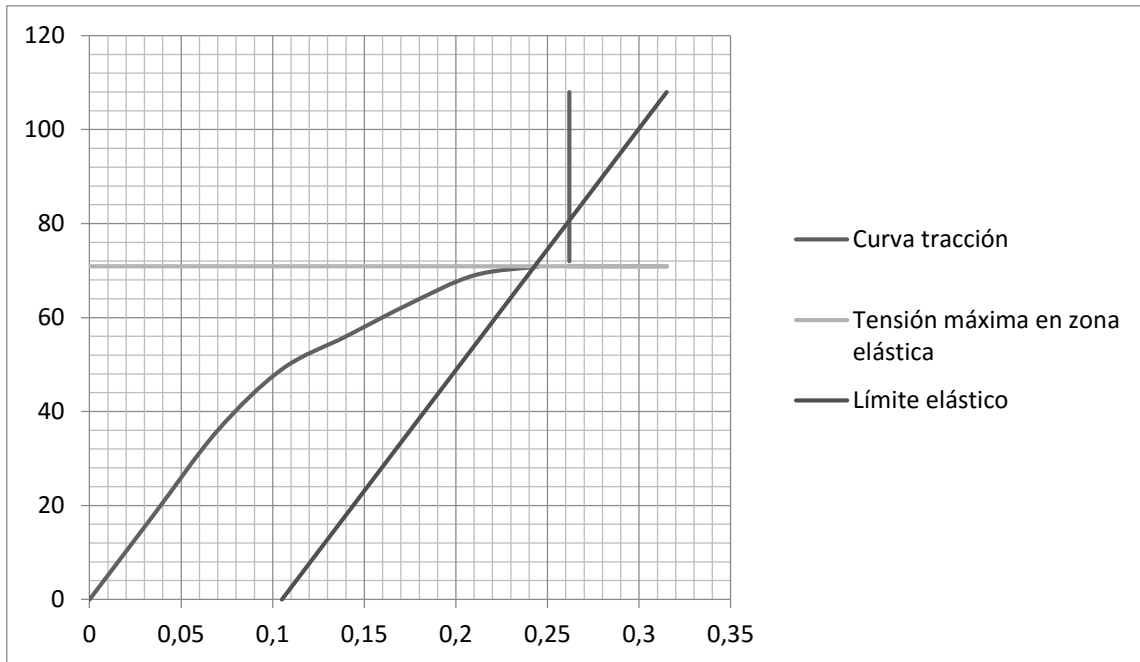
- Ensayo de tracción.
- Dureza.
- Análisis químico.
- Análisis metalográfico.

Los resultados del ensayo de tracción para el bloque son los siguientes.

- ✓ Material: EN-GJS-500-7U.
- ✓ Área: 153,50 mm².
- ✓ Longitud de 100 mm.
- ✓ Sección circular.

La norma UNE-EN 1563:2012 [1] establece que un material EN-GJS-500-7U con un espesor de pared entre 30 y 60 mm debe poseer una resistencia mínima a la tracción de 450 N/mm², un límite de elasticidad de 300 N/mm² y el alargamiento mínimo 7%. Una vez se analicen los datos obtenidos de la gráfica 3.1, tabla 3.1 y tabla 3.2 se podrá decidir si la muestra es aceptable.

A continuación, se muestran la gráfica obtenida del ensayo y los resultados que la originaron dispuestos en tablas (gráfica 3.1).



Gráfica 3.1. Curva tensión deformación bloque (kN-mm).

La gráfica 3.1 es la curva tensión-deformación obtenida a raíz del ensayo realizado. En ella observamos el límite elástico máximo en relación con la fuerza aplicada y su longitud máxima de extensión. En el momento que la línea de límite elástico cruza la curva de tracción esta probeta sufre deformaciones permanentes, aunque cese la tensión.

La línea horizontal indica el límite elástico. El límite elástico es la tensión en la cual el material tiene una deformación plástica del 0,2%. El límite elástico convencional del 0,2% es la tensión a la cual dicha línea corta con la curva tensión deformación [2].

A continuación, en la tabla 3.1 se detallan los datos obtenidos durante el ensayo.

| mm | Curva tracción kN | Tensión máxima en la zona elástica | Límite elástico |
|-----------|------------------------------|---|------------------------|
| 0 | 0 | 70,8716 | |
| 0,035 | 18 | 70,8716 | |
| 0,070 | 36 | 70,8716 | |
| 0,105 | 49 | 70,8716 | 0 |
| 0,140 | 46 | 70,8716 | 18 |
| 0,175 | 63 | 70,8716 | 36 |
| 0,210 | 69 | 70,8716 | 54 |
| 0,245 | 70,8716 | 70,8716 | 72 |
| 0,262 | 72 | 70,8716 | |
| 0,262 | 81 | 70,8716 | |
| 0,262 | 90 | 70,8716 | |
| 0,262 | 99 | 70,8716 | |
| 0,262 | 108 | 70,8716 | |

Tabla 3.1. Resultados obtenidos del ensayo de tracción del bloque.

En la tabla 3.2 se observa que la resistencia a la tracción de la probeta es de 460 N/mm², el límite convencional de elasticidad es 437,16 N/mm² y el alargamiento es de un 11%. Se observa que el material del bastidor es EN-GJS-500-7U probado en este ensayo cumple con los datos valores proporcionados en la norma UNE-EN 1563 [1] para dicho material. En esa norma se indica unos valores mínimos (450 N/mm² mínimo para resistencia a la tracción y un alargamiento mínimo del 7%).

| Medida | Valor | Unidad |
|--|-----------|-------------------|
| L_f-L₀ | 7,70 | mm |
| R_p Resistencia a la tracción | 460 | N/mm ² |
| F_m | 108,80 | kN |
| R_m | 708,80 | N/mm ² |
| A | 11 | % |
| E | 165466,50 | N/mm ² |
| R_{p0,2} Límite convencional | 437,16 | N/mm ² |
| Ext. No prop. | 0,20 | % |
| Dureza | 201 | HB |

Tabla 3.2. Tabla resumen de resultados del ensayo de tracción del bloque.

- L_f-L₀: es la diferencia entre la longitud bajo carga y la longitud inicial.
- F_m: es la fuerza máxima.
- R_m: reducción máxima.
- A: Alargamiento.
- E: Punto de rotura.
- R_p: reducción máxima.

De acuerdo con la norma adoptada para este ensayo (UNE-EN 1563:2012 [1]) la dureza debe estar entre 100 y 230, en este caso el resultado ha sido 201. Por lo que la probeta está aceptada. Ver Apéndice I.

A continuación, en la tabla 3.3 se detalla la composición química de la probeta del bloque.

| Elemento | Porcentaje |
|-----------|------------|
| Carbono | 3,620 |
| Silicio | 2,490 |
| Manganeso | 0,290 |
| Fósforo | 0,018 |
| Azufre | 0,015 |
| Titanio | 0,009 |
| Magnesio | 0,040 |
| Cobre | 0,443 |

Tabla 3.3. Relación de componentes químicos del bloque.

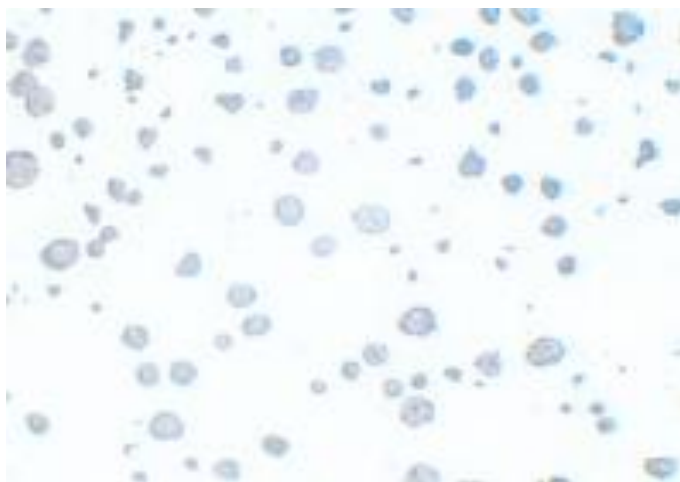


Imagen 3.3. Vista del microscopio X100



Imagen 3.4. Vista del microscopio X400.

En la imagen 3.3 podemos observar los esferoides más pequeños que en el caso de la culata, esta imagen está tomada con 100 aumentos. Se puede observar que hay un 50% de Ferrita y un 50 % de Perlita.

El material EN-GJS-500-7U tiene una estructura consistente nódulos de grafito (negro), ferrita (blanco) y perlita (gris) [4] como se comprueba en la imagen 3.3.

Para determinar la forma y el tamaño del grafito nos remitimos a la norma europea UNE-EN 945-1:2012 [3]. Comparando la imagen obtenida en el microscopio con las diferentes imágenes de dicha norma determinamos que la forma del grafito es la VI. Como observamos en a la imagen 3.5.

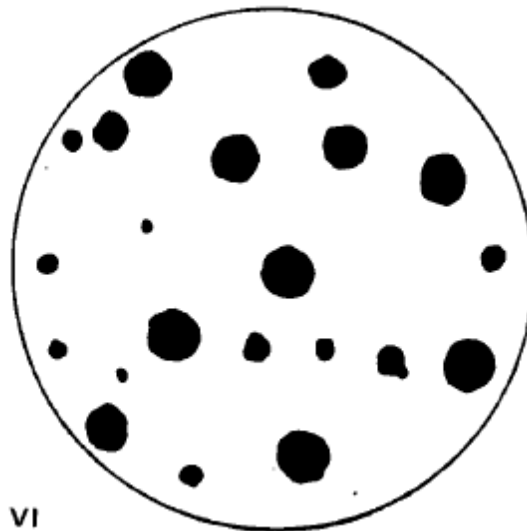


Imagen 3.5. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

Una vez determinada la forma determinamos el tamaño del grafito, en la imagen 3.6 observamos las imágenes que nos proporciona la norma UNE-EN 945-1:2012 [3] y de la que determinamos, por comparación, que el tamaño del grafito es el 7.

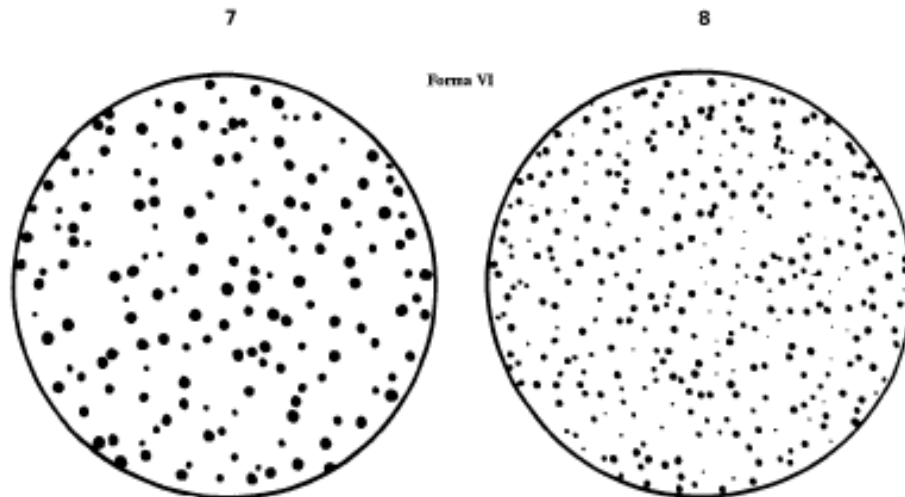


Imagen 3.6. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

En la imagen 3.4 se observa la estructura de la probeta que se está analizando con un aumento de 400 aumentos.

En la imagen 3.6 se puede observar cuál es el tamaño de las partículas del grafito según el número de referencia obtenido anteriormente:

| Número de referencia | Medidas de las partículas observadas a 100 aumentos | Medida verdadera |
|----------------------|---|------------------|
| | mm | mm |
| 1 | >100 | >1 |
| 2 | 50 a 100 | 0,500 a 1 |
| 3 | 25 a 50 | 0,250 a 0,50 |
| 4 | 12 a 25 | 0,120 a 0,250 |
| 5 | 6 a 12 | 0,060 a 0,120 |
| 6 | 3 a 6 | 0,030 a 0,060 |
| 7 | 1,5 a 3 | 0,015 a 0,030 |
| 8 | <1,5 | <0,015 |

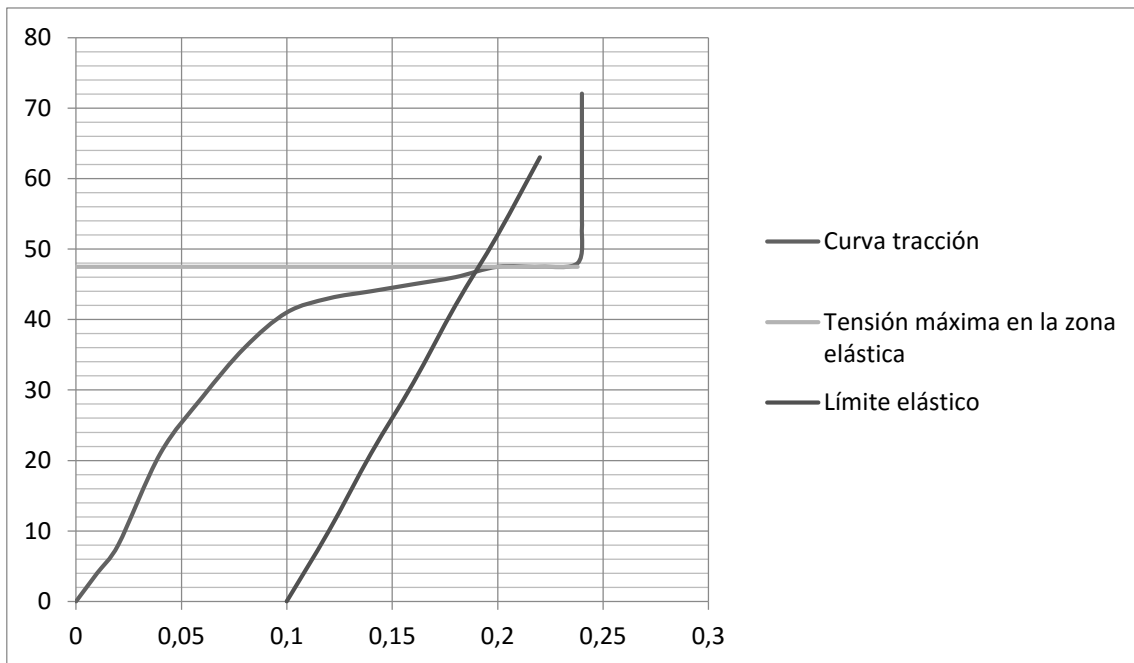
Tabla 3.4. Relación del tamaño del grafito.

Como podemos observar nuestro número de referencia es el 7 y la medida del grafito estará entre 0,015 y 0,030 mm.

3.3 Resultados culata

La culata estudiada pertenece a un motor de cuatro tiempos, de 16 cilindros y 7680 kW.

De acuerdo a la norma UNE-EN 1563:2012 [1] para un material EN-GJS-400-15U el material tiene que tener una resistencia a la tracción de 400 N/mm² y el alargamiento mínimo será de un 15%. Como podemos observar de los resultados obtenidos, nuestra probeta está dentro de los valores descritos por la norma.



Gráfica 3.2. Curva tensión deformación (kN-mm) del ensayo de tracción de la culata.

| mm | Curva tracción kN | Tensión máxima en la zona elástica | Límite elástico |
|-----------|----------------------------------|---|----------------------------|
| 0 | 0 | 47,48 | |
| 0,01 | 4 | 47,48 | |
| 0,02 | 8 | 47,48 | |
| 0,04 | 21 | 47,48 | |
| 0,06 | 29 | 47,48 | |
| 0,08 | 36 | 47,48 | |
| 0,10 | 41 | 47,48 | 0 |
| 0,12 | 43 | 47,48 | 10 |
| 0,14 | 44 | 47,48 | 21 |
| 0,16 | 45 | 47,48 | 31 |
| 0,18 | 46 | 47,48 | 42 |
| 0,20 | 47,48 | 47,48 | 52 |
| 0,22 | 47,48 | 47,48 | 63 |
| 0,238 | 48 | 47,48 | |
| 0,24 | 53 | | |
| 0,24 | 54 | | |
| 0,24 | 61 | | |
| 0,24 | 65 | | |
| 0,24 | 72,05 | | |

Tabla 3.5. Resultados obtenidos durante el ensayo de tracción de la culata.

El material de nuestra culata es EN-GJS-400-15U el espesor de la pared está entre 30 y 60 mm con lo cual la resistencia mínima a la tracción es 390 N/mm², el límite convencional de elasticidad (R_p) 250 N/mm² y el alargamiento mínimo 14%, como podemos observar después de los datos obtenidos nuestra culata cumple con los requisitos mínimos según la normal. Ver apéndice I. A continuación, se muestra de forma esquemática los resultados del ensayo de tracción.

| | | |
|------------------------------------|----------|-------------------|
| L_f-L₀ | 8,1 | mm |
| Resistencia a la tracción | 469,40 | N/mm ² |
| F_m | 72,05 | kN |
| R_m | 474,80 | N/mm ² |
| A | 16 | % |
| E | 83434,50 | N/mm ² |
| R_p | 293,09 | N/mm ² |
| Ext. No prop. | 0,20 | % |
| Dureza | 172 | HB |

Tabla 3.6. Resumen de resultados obtenidos durante el ensayo de tracción de la culata.

- L_f-L₀: es la diferencia entre la longitud bajo carga y la longitud inicial.
- F_m: es la fuerza máxima.
- R_m: reducción máxima.
- A: Alargamiento.
- E: Punto de rotura.
- R_p: reducción máxima.

A continuación, en la tabla 3.7 se detalla la composición química de la culata, que coincide con los requerimientos para dicho material.

| ELEMENTO | % |
|-----------|-------|
| CARBONO | 3,630 |
| SILICIO | 2,210 |
| MANGANESO | 0,180 |
| FÓSFORO | 0,016 |
| AZUFRE | 0,021 |
| MAGNESIO | 0,051 |
| COBRE | 0,096 |

Tabla 3.7. Relación de componentes químicos de la culata.

Esta culata tiene una composición esferoidal en un 90% y su estructura es ferrítica. A continuación, mostramos su composición metalográfica:

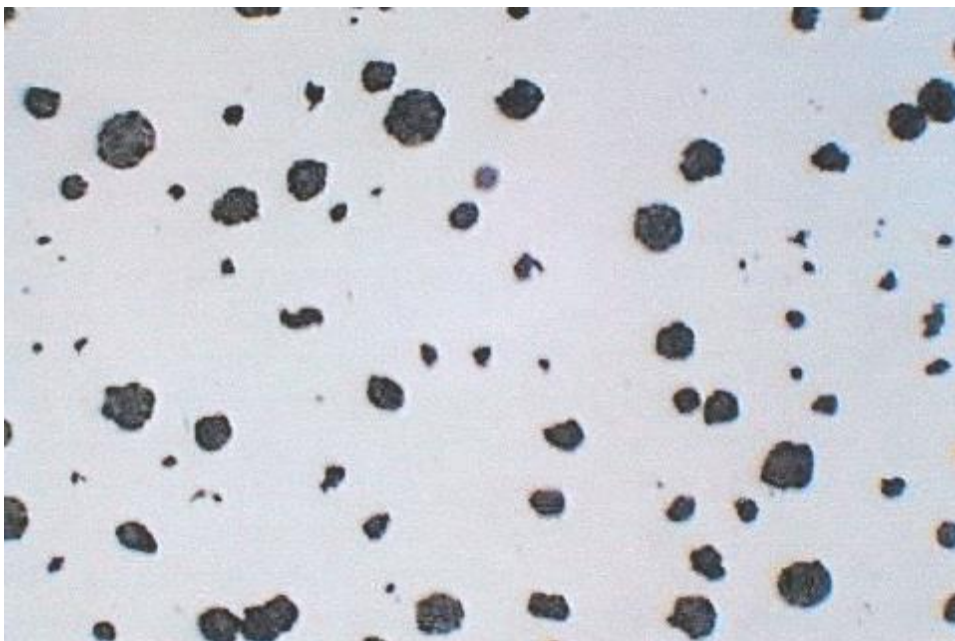


Imagen 3.7. Vista del microscopio de la probeta de la culata X100.

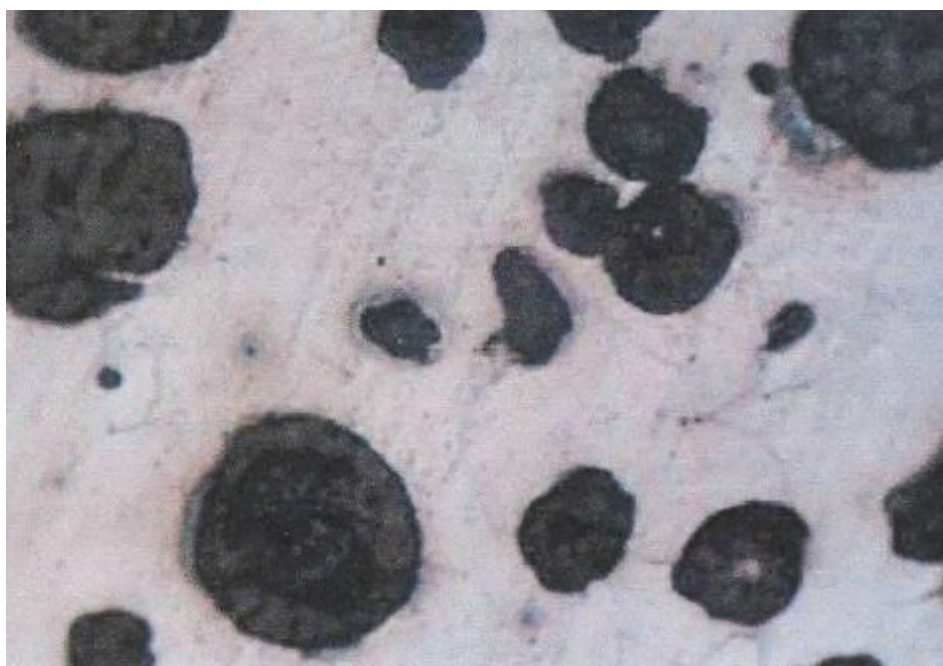


Imagen 3.8. Vista del microscopio de la probeta de la culata X400

En estas dos imágenes se puede apreciar perfectamente la estructura metalográfica, los esferoides, de la culata de este motor.

Al comparar la imagen 3.7 tomada con 100 aumentos con las correspondientes de la norma UNE-EN-945-1:2012 [3] determinamos que el tipo de grafito es esferoidal al 90% y que la forma de grafito es la VI. La forma de que

nos indica la norma UNE-EN-945-1:2012 [3] para la forma VI del grafito es la que sigue:

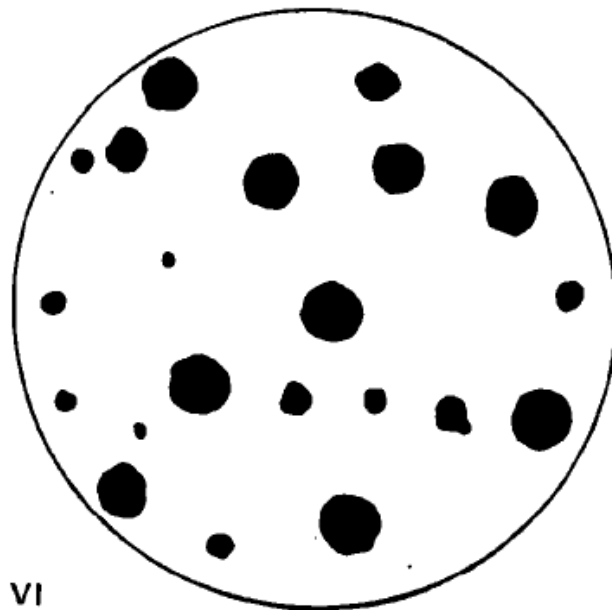


Imagen 3.9. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

Una vez determinada la forma de grafito que es la VI se procede a examinar y a determinar el tamaño de grafito, para eso acudimos a la norma UNE-EN-945-1:2012 [3] y en el que determinamos que el tamaño es el 6, como se puede observar en la siguiente imagen al compararla con la obtenida con el microscopio.

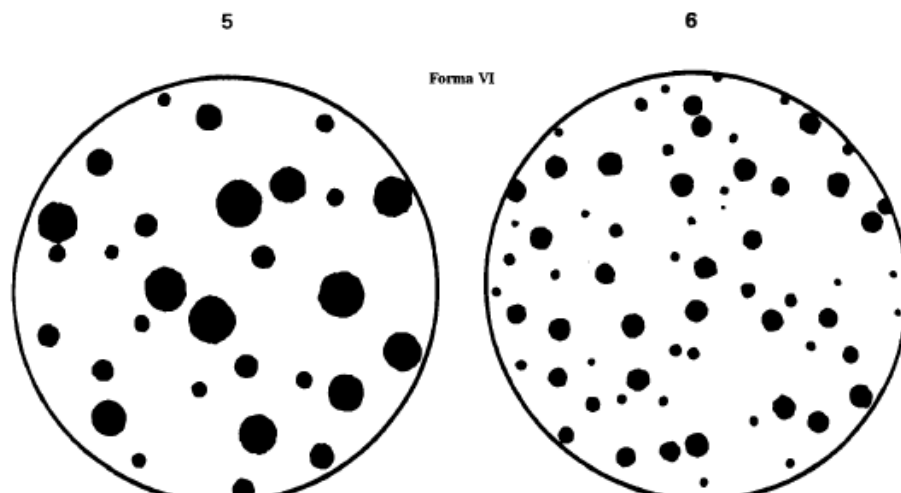


Imagen 3.10. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

En la siguiente tabla 3.8 se puede averiguar el tamaño de las partículas del grafito según el número de referencia obtenido anteriormente:

| Número de referencia | Medidas de las partículas observadas a 100 aumentos | Medida verdadera |
|----------------------|---|------------------|
| | mm | mm |
| 1 | >100 | >1 |
| 2 | 50 a 100 | 0,500 a 1 |
| 3 | 25 a 50 | 0,250 a 0,500 |
| 4 | 12 a 25 | 0,120 a 0,250 |
| 5 | 6 a 12 | 0,060 a 0,120 |
| 6 | 3 a 6 | 0,030 a 0,060 |
| 7 | 1,5 a 3 | 0,015 a 0,030 |
| 8 | <1,5 | <0,015 |

Tabla 3.8. Relación del tamaño del grafito.

Como podemos observar nuestro número de referencia es el 6 y la medida del grafito estará entre 0,03 y 0,06 mm.

3.3.1 Elementos químicos determinantes para una culata

El contenido de carbono durante la fabricación debe situarse entre un 3% o un 4%, si este porcentaje de carbono fuese superior a los valores dados se podría producir la flotación del carbono. Cuando se produce afecta de forma negativa a las propiedades mecánicas de la pieza, no pudiendo ésta cumplir con los objetivos que debería.

Durante la solidificación, la precipitación de grafito en forma nodular produce fundiciones de hierro dúctil que se expande en mayor grado y con más fuerza que el hierro gris. Consecuentemente esto requiere moldes más rígidos y mayor atención en la alimentación de la carga fundida, si se requiere fundiciones robustas.

El contenido de silicio en el hierro esferoidal oscila entre 2 y 2,6% debido a que el silicio afecta al carbono equivalente, también afecta el número de

esferoides y la flotación del grafito, el incremento del porcentaje de silicio desplaza el eutéctico hacia la izquierda.

El manganeso no se sobrepasa el 0,20% debido a que queremos obtener una composición ferrítica para la culata.

La ferrita es el más blando y dúctil constituyente de los aceros. Cristaliza en una estructura BBC. Tiene una dureza de 95 Vickers, y una resistencia a la rotura de 28 N/mm², llegando a un alargamiento del 35 al 40%. Al microscopio aparece como granos monofásicos, con límites de grano más irregulares que la austenita. El motivo de esto es que la ferrita se ha formado en una transformación en estado sólido, mientras que la austenita procede de la solidificación. Estas propiedades de la ferrita ayudan a que la culata sea el elemento perfecto para efectuar el cierre de la cámara de combustión y soportar las presiones y temperaturas que se alcanzan en ella.

El fósforo no afecta ni la forma ni el tamaño de la fundición esferoidal, la limitación de su presencia en la composición de la culata se debe a las porosidades que pueden presentarse con exceso de fósforo, debiéndose limitar su contenido por el incremento del carbono y del silicio.

En el caso del azufre el motivo de limitar su contenido está motivado a su gran afinidad con el azufre que le hace formar sulfuros estables (MgS), pudiendo aparecer magnesio en la escoria. Además, tiene efecto antiesferoidizante, debido a que junto con el oxígeno y el azufre inhiben la nucleación, esto implica que se evita la formación de carburo de hierro.

El magnesio es el responsable de la esferoidización del grafito, es un poderoso desulfurante y desoxidante. Las teorías hasta el momento estudiadas dan por hecho que el magnesio es el centro de la nucleación y el que produce dicha nucleación en forma esferoidal.

Para la fabricación de la culata que realizamos la fundición por moldeo es determinante la presencia del cobre. El cobre puro no es muy adecuado para fundición por moldeo, porque se produce galleo, entonces puede crear una gran cantidad de hoyos en la superficie de las piezas fundidas. Además, el cobre destruye los esferolitos y dificulta la grafitización, es por ello que su presencia en

la composición de la culata no deber ser mayor a 0,10%, para nuestro caso 0,096%.

3.4 Resultados camisa

Como en los casos anteriores se procede a realizar las siguientes pruebas:

- Ensayo de tracción.
- Dureza.
- Análisis químico.
- Análisis metalográfico.

El material de la camisa a analizar es una fundición EN-GJL-200. Este material es una fundición gris, es por ello que nos remitiremos a la norma UNE-EN 1561:2012 [5].

A continuación, detallamos los resultados obtenidos en la tabla 3.9. La probeta tiene un área de 824,99 mm², diámetro 32 mm y una longitud de 100 mm, de sección circular. El ensayo se ha realizado con una célula de 400 kN y la velocidad ha sido de 1,5 kN/s, la temperatura ambiente 20°C.

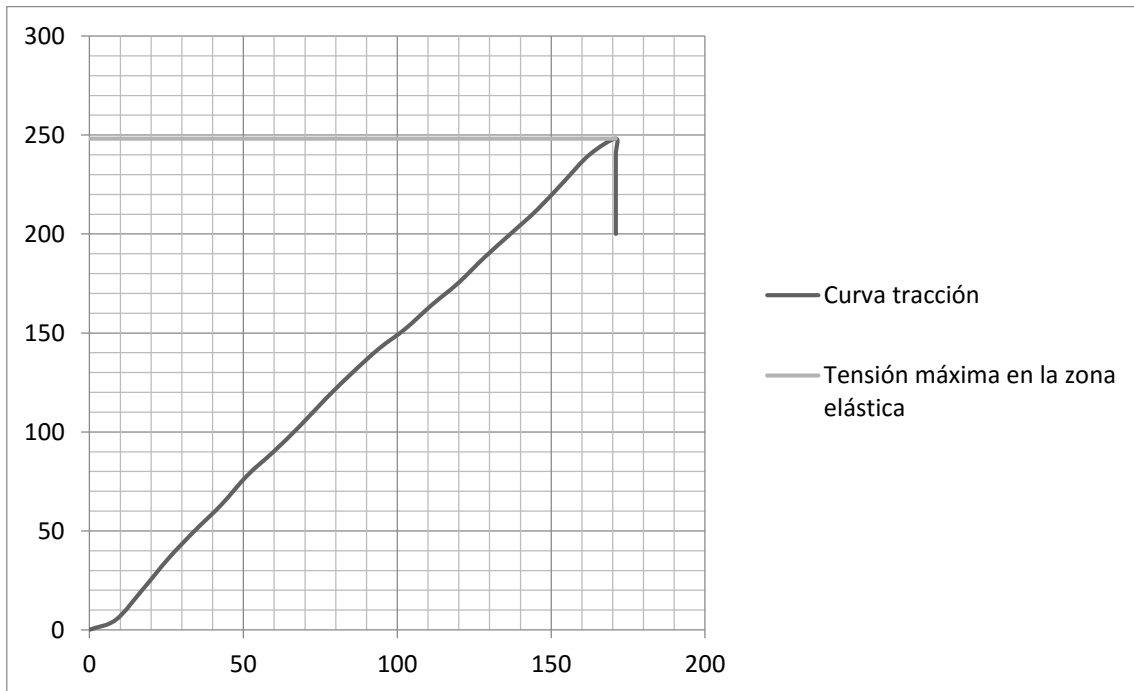
| Concepto | Valor | Unidad |
|------------------------------------|---------|-------------------|
| L_f-L₀ | 0,000 | mm |
| F_m | 248,210 | kN |
| R_m | 300,860 | N/mm ² |
| Dureza | 240 | HB |

Tabla 3.9. Resultados obtenidos durante el ensayo de tracción de la camisa.

- F_m: es la fuerza máxima.
- L_f-L₀: es la diferencia entre la longitud bajo carga y la longitud inicial.
- R_m: tensión máxima en la zona elástica.

De acuerdo con la norma UNE-EN 1561:2012 [5] para un material EN-GJL-200 (Ver Apéndice II) para un espesor de pared entre 20 y 40 mm el material tiene que tener una resistencia mínima a la tracción de 170 N/mm². Se puede observar a partir de los resultados obtenidos que nuestra probeta está dentro de los valores descritos por la norma [5] porque tiene una resistencia a la tracción de 300,860 N/mm².

En la tabla observamos que la longitud final e inicial es la misma, debido a la que la esta $L_f - L_0$ es igual a 0. La camisa es un elemento alojado dentro del bloque del motor, en el espacio existente entre la camisa y el bloque es el destinado para la refrigeración de la camisa. Si este elemento tuviese alargamiento antes de la rotura implicaría grandes tensiones con el bloque.



Gráfica 3.3. Curva tensión deformación (kN-mm) del ensayo de tracción de la camisa.

Como se puede observar en la gráfica 3.3 la probeta presenta una rotura frágil. Fernández y Ríos [6] compararon el alargamiento en una fundición gris y en una esferoidal y establecieron que en la fundición gris éste debe ser mínimo. La dureza de la camisa (240 HB) con respecto al bloque (201 HB) y a la culata (172 HB) también es un factor determinante en el tipo de rotura ocurrida: “*el modo frágil de fractura en las de mayor dureza.*” [6]. Cuando el ensayo de tracción tiene como resultado una fractura frágil (como la observada en la gráfica 3.3) la resistencia haya es una tensión de fractura crítica, porque en ese valor se produce la rotura.

Marulanda et al [7] describió como “limpia” la rotura de la fundición gris. Este factor es de suma importancia para evitar el daño en el bloque si se produjese una rotura de la camisa.

| <i>mm</i> | <i>Curva tracción kN</i> | <i>Tensión máxima en la zona elástica</i> |
|-----------|------------------------------|---|
| 0 | 0 | 248,1 |
| 8,55 | 5 | 248,1 |
| 17,10 | 20 | 248,1 |
| 25,65 | 36 | 248,1 |
| 34,20 | 50 | 248,1 |
| 42,75 | 63 | 248,1 |
| 51,30 | 78 | 248,1 |
| 59,85 | 90 | 248,1 |
| 68,40 | 103 | 248,1 |
| 76,95 | 117 | 248,1 |
| 85,50 | 130 | 248,1 |
| 94,05 | 142 | 248,1 |
| 102,60 | 152 | 248,1 |
| 111,15 | 164 | 248,1 |
| 119,70 | 175 | 248,1 |
| 128,25 | 188 | 248,1 |
| 136,80 | 200 | 248,1 |
| 145,35 | 212 | 248,1 |
| 153,90 | 226 | 248,1 |
| 162,45 | 240 | 248,1 |
| 171 | 248,1 | 248,1 |
| 171 | 240 | 248,1 |
| 171 | 220 | 248,1 |
| 171 | 200 | 248,1 |

Tabla 3.10. Resultados obtenidos durante el ensayo de tracción de la camisa.

En la gráfica se muestra la curva de tensión deformación del ensayo realizado. Como se puede observar el comportamiento es diferente que en el caso de la culata o del bastidor. La camisa tiene mayor resistencia a la tracción y tiene mayor alargamiento que en el caso de la culata y del bastidor, además se observa que la forma de su curva es una línea recta.

A continuación, en la tabla 3.11 se detalla la composición química de la probeta de la camisa:

| Elemento | Porcentaje |
|-----------|------------|
| Carbono | 3,020 |
| Silicio | 1,320 |
| Manganeso | 0,800 |
| Fósforo | 0,440 |
| Azufre | 0,025 |
| Titanio | 0,380 |
| Vanadio | 0,240 |

Tabla 3.11. Relación de componentes químicos de la camisa.

La cantidad de fósforo (tabla 3.11) presente en la pieza es la que implica un mayor proceso de fragilización y con ello mayor probabilidad de que ocurra una rotura frágil. El porcentaje de carbono también es un factor determinante en la fragilidad de la pieza (Marulanda et al [7]). Los porcentajes deberán estar entre el 2,5% y 4%. Como se observa en la probeta de la camisa es de un 3,02%, con lo cual está con un porcentaje alto, aunque en comparación con el bloque (3,62%) y la culata (3,63%) presenta un valor menor. Si observamos el porcentaje de carbono se puede concluir que las tres piezas son frágiles, pero la estructura molecular del bloque y de la camisa no les permite realizar una rotura frágil.

“Para evitar el desgaste de algunos objetos se recurre a técnicas de tratamientos superficiales como el recubrimiento nanoestructurado para proporcionar una dureza superior en la camisa” [8].

Se consideran fundiciones grises a aquéllas en las que el porcentaje de silicio se encuentra entre un 1% y un 3,8% [9].

El siguiente paso es el examen metalográfico de la probeta.



Imagen 3.11. Vista del microscopio X100



Imagen 3.12. Vista del microscopio X400.

En la imagen 3.11 se puede observar que el grafito se dispone forma laminar y la estructura es perlítica con esteadita en la que está uniformemente repartida. En la imagen 3.12 tomada con 400 aumentos podemos observar a la perlita y a la esteadita, que es la parte blanca.

Para determinar la forma y el tamaño del grafito nos remitimos a la norma europea UNE-EN 945-1:2012 [3] (Designación de la microestructura del grafito). Comparando la imagen obtenida en el microscopio con las diferentes imágenes de dicha norma determinamos que la forma del grafito es la I. Como observamos en la imagen 3.13.

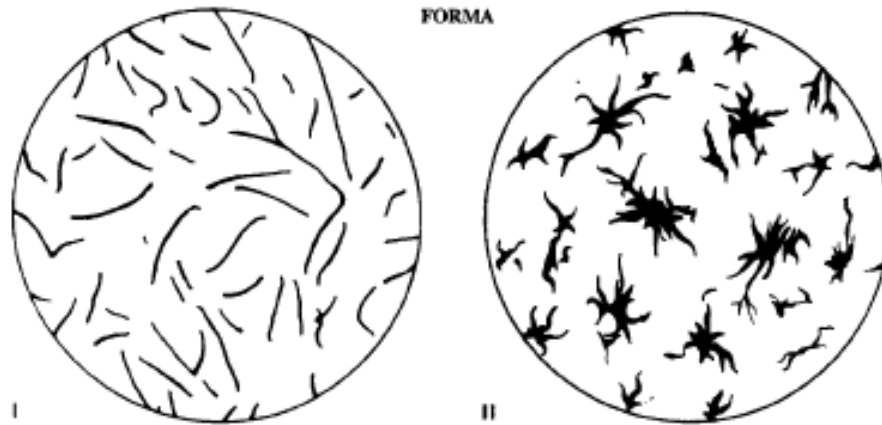


Imagen 3.13. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

Una vez determinada la forma determinamos el tamaño del grafito, en la imagen 3.13 observamos las imágenes que nos proporciona la norma y de la que determinamos, por comparación, que el tamaño del grafito es el 4. La obtención del tamaño del grafito se obtiene por comparación de la muestra observada al microscopio y de la planilla de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3].

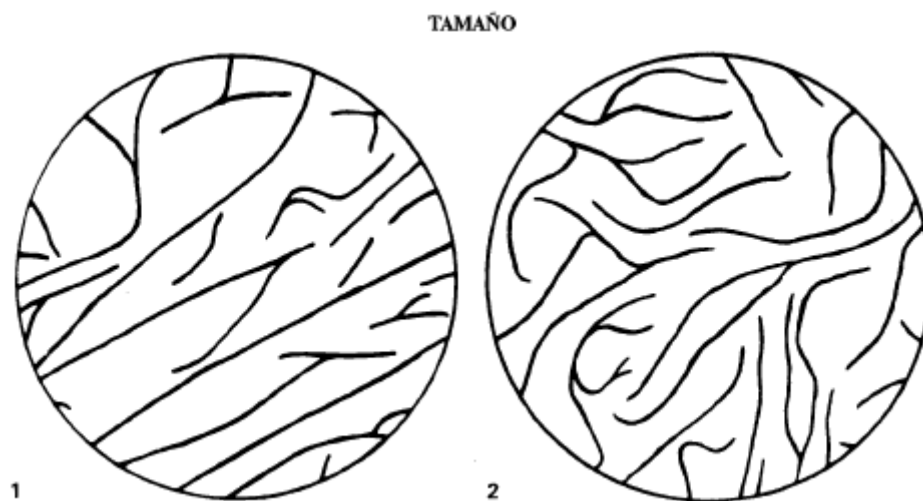


Imagen 3.14. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

En la imagen 3.14 se puede observar cuál es el tamaño de las partículas del grafito según el número de referencia obtenido anteriormente:

| Número de referencia | Medidas de las partículas observadas a 100 aumentos | Medida verdadera |
|----------------------|---|------------------|
| | mm | mm |
| 1 | >100 | >1 |
| 2 | 50 a 100 | 0,500 a 1 |
| 3 | 25 a 50 | 0,250 a 0,50 |
| 4 | 12 a 25 | 0,120 a 0,250 |
| 5 | 6 a 12 | 0,060 a 0,120 |
| 6 | 3 a 6 | 0,030 a 0,060 |
| 7 | 1,5 a 3 | 0,015 a 0,030 |
| 8 | <1,5 | <0,015 |

Tabla 3.12. Relación del tamaño del grafito.

Como podemos observar nuestro número de referencia es el 4 y la medida del grafito estará entre 0,12 y 0,25 mm.

3.4.1 Elementos químicos determinantes en la camisa

La composición de los materiales usados en la fabricación de las camisas y los segmentos condiciona la magnitud del desgaste corrosivo que puede afectar. La presencia de fósforo en la fundición que constituye la camisa confiere resistencia a la corrosión gracias al eutéctico fosforoso que forma con la cementita. Este eutéctico que se presenta en forma de protuberancias sobre la superficie tiene la propiedad de retener más aceite que la fundición base, por lo cual, el rozamiento entre la camisa y los segmentos durante el proceso ataque-fricción-desgaste es menos severo. Las propiedades mecánicas pueden modificarse en función de las características microestructurales, las cuales a la vez dependen de la composición química del metal base, condiciones de fusión, tratamiento del metal fundido en cuchara y de la velocidad de enfriamiento durante la solidificación [10].

Si comparamos los resultados obtenidos en la composición química de la camisa con la fundición del bloque o de la culata observamos que la camisa tiene menos cantidad de carbono y silicio, no tiene cobre y tiene más cantidad de manganeso, fósforo y azufre, además en su composición aparece el vanadio.

Estas cantidades son las esperadas debido a que es una fundición gris y en ella no aparecen esferoides de ahí una menor cantidad de silicio. El silicio es un grafitizador es por ello que en la fundición gris hay menos cantidad de este componente, debido a que no es necesaria esa reacción.

El manganeso está en un porcentaje casi 4 veces mayor (0,80% → 0,29%) que, en el caso de la culata, gracias a esto tenemos más porcentaje de perlita.

Tenemos mayor cantidad de fósforo en la camisa que en el bastidor debido a que necesitamos este elemento para la formación de la esteadita.

El azufre es un elemento que estabiliza los carburos por esa razón en esta composición (la camisa) puede aparecer en mayor proporción. Se puede observar que el bloque tiene una proporción del 0,015%, la culata 0,021% y la camisa 0,025% de azufre.

El tamaño del grafito en el bloque se sitúa entre 0,015 y 0,030 mm, en la culata entre 0,03 y 0,06 y en la camisa entre 0,12 y 0,25 mm. Como se observa a la vista de estos resultados el grafito tiene mayor tamaño en la camisa, que es una fundición gris, que en la culata o en el bloque que son fundiciones esferoidales. El mayor porcentaje de azufre, fósforo y manganeso favorecen el crecimiento del grafito.

3.5 Apéndice

Apéndice I: Datos que deben cumplir la fundición esferoidal según la norma UNE-EN 1563:2012.

| Designación del material | | Espesor determinante de pared t (mm) | Resistencia mínima a la tracción R_m (N/mm ²) | Límite convencional de elasticidad 0.2% $R_{p0.2}$ (N/mm ²) | Alargamiento mínimo A (%) |
|--------------------------|-----------|---|--|--|------------------------------|
| Simbólica | Numérica | | | | |
| EN-GJS-350-22U-LT | EN-JS1019 | $t \leq 30$ | 350 | 220 | 22 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 330 | 210 | 18 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 320 | 200 | 15 |
| EN-GJS-350-22U-RT | EN-JS1029 | $t \leq 30$ | 350 | 220 | 22 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 330 | 210 | 18 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 320 | 200 | 15 |
| EN-GJS-350-22U | EN-JS1032 | $t \leq 30$ | 350 | 220 | 22 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 330 | 210 | 18 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 320 | 200 | 15 |

| Designación del material | | Espesor determinante de pared t (mm) | Resistencia mínima a la tracción R_m (N/mm ²) | Límite convencional de elasticidad 0.2% $R_{p0,2}$ (N/mm ²) | Alargamiento mínimo A (%) |
|--------------------------|-----------|---|--|--|------------------------------|
| Simbólica | Numérica | | | | |
| EN-GJS-400-18U-LT | EN-JS1049 | $t \leq 30$ | 400 | 240 | 18 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 390 | 230 | 15 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 370 | 220 | 12 |
| EN-GJS-400-18U-RT | EN-JS1059 | $t \leq 30$ | 400 | 250 | 18 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 390 | 250 | 15 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 370 | 240 | 12 |
| EN-GJS-400-18U | EN-JS1062 | $t \leq 30$ | 400 | 250 | 18 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 390 | 250 | 15 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 370 | 240 | 12 |
| EN-GJS-400-15U | EN-JS1072 | $t \leq 30$ | 400 | 250 | 15 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 390 | 250 | 14 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 370 | 240 | 11 |

| Designación del material | | Espesor determinante de pared t (mm) | Resistencia mínima a la tracción R_m (N/mm ²) | Límite convencional de elasticidad 0.2% $R_{p0,2}$ (N/mm ²) | Alargamiento mínimo A (%) |
|--------------------------|-----------|---|--|--|------------------------------|
| Simbólica | Numérica | | | | |
| EN-GJS-450-10U | EN-JS1132 | $t \leq 30$ | 450 | 310 entre fabricante | 10 y comprador |
| | | $30 < t \leq 60$ | A convenir | | |
| | | $60 < t \leq 200$ | | | |
| EN-GJS-500-7U | EN-JS1082 | $t \leq 30$ | 500 | 320 | 7 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 450 | 300 | 7 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 420 | 290 | 5 |
| EN-GJS-600-3U | EN-JS1092 | $t \leq 30$ | 600 | 370 | 3 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 600 | 360 | 2 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 550 | 340 | 1 |
| EN-GJS-700-2U | EN-JS1102 | $t \leq 30$ | 700 | 420 | 2 |
| | | $30 < t \leq 60$ | 700 | 400 | 2 |
| | | $60 < t \leq 200$ | 660 | 380 | 1 |

| Designación del material | | Espesor determinante de pared t (mm) | Resistencia mínima a la tracción R_m (N/mm ²) | Límite convencional de elasticidad 0.2% $R_{p0,2}$ (N/mm ²) | Alargamiento mínimo A (%) |
|--------------------------|-----------|---|--|--|------------------------------|
| Simbólica | Numérica | | | | |
| EN-GJS-800-2U | EN-JS1112 | $t \leq 30$ | 800 | 480 | 2 y comprador |
| | | $30 < t \leq 60$ | A convenir | entre fabricante | |
| | | $60 < t \leq 200$ | | | |
| EN-GJS-900-2U | EN-JS1122 | $t \leq 30$ | 900 | 600 | 2 y comprador |
| | | $30 < t \leq 60$ | A convenir | entre fabricante | |
| | | $60 < t \leq 200$ | | | |

Apéndice II. Características que debe cumplir la fundición gris. UNE-EN 1561:2012.

| Designación del material | | Espesor de determinante pared (mm) | | Resistencia a los valores tracción, R _m obligatorios | |
|--------------------------|-----------|------------------------------------|------------------|---|--|
| Simbólica | Numérica | Hasta (excluido) | Desde (incluido) | Sobre muestras coladas independientes N/mm ² | Sobre muestras adjuntas N/mm ² |
| EN-GJL-100 | EN-JL1010 | 5 | 40 | 100 a 200 | — |
| EN-GJL-150 | EN-JL1020 | 2,5 | 5 | 150 a 250 | — |
| | | 5 | 10 | | — |
| | | 10 | 20 | | — |
| | | 20 | 40 | | 120 |
| | | 40 | 80 | | 110 |
| | | 80 | 150 | | 100 |
| EN-GJL-200 | EN-JL1030 | 150 | 300 | 200 a 300 | 90 |
| | | 2,5 | 5 | | — |
| | | 5 | 10 | | — |
| | | 10 | 20 | | — |
| | | 20 | 40 | | 170 |
| | | 40 | 80 | | 150 |
| EN-GJL-200 | EN-JL1030 | 80 | 150 | 200 a 300 | 140 |
| | | 150 | 300 | | 130 |

3.6 Bibliografía

- [1] UNE-EN 1563:2012. Fundición de grafito esferoidal.
- [2] Barroso Herrero, S. e Ibáñez Ulargui, J. Introducción al conocimiento de los materiales. Cuadernos de la UNED 2002.
- [3] UNE-EN 945-1:2012. Designación de la microestructura de la fundición de hierro. Parte 1: Clasificación del grafito por análisis visual.
- [4] Andersson, C. G. (2002). Development of fabrication technology for copper canisters with cast inserts. Stockholm, Sweden: SKB.
- [5] UNE-EN 1561:2012. Fundición. Fundición gris.
- [6] Fernández-Carrasquilla, J., & Ríos, R. (1999). Estudio de una fundición de grafito laminar mediante mecánica de la fractura. *Revista de metalurgia*, 35(6), 353-367.
- [7] Marulanda, J. L., Zapata, A., & Grajales, D. M. (2007). Recuperación Y Soldabilidad De Piezas De Fundición De Hierro. *Scientia et Technica*, 1(37).
- [8] Pedrero, J. L., Solano, J. J., Reyes, S., Rodríguez, J. M., Arellano, J. A., & Piña, G. (2008). Efecto del coeficiente de fricción en la distribución de presiones anillo-camisa de un motor de combustión interna. *Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la Somim* (307-317).
- [9] Bravo Crisóstomo, F. E. (2012). Tratamientos térmicos a fundiciones grises de la Región Grau fabricadas en horno de cubilote.
- [10] Espitia, P. A. P., Ceballos, A. M. P., Velásquez, C. M. S., Arroyave, F. A. V., Sierra, R. E. A., Arango, J. M. R., & González, H. D. M. (2011). Efecto de la inoculación en cuchara de hierros grises fundidos en horno de cubilote. *Revista Colombiana de Materiales*, (1).

Capítulo 4. Mecanismos de corrosión. Antecedentes y conceptos previos

Capítulo 4: Mecanismos de corrosión. Antecedentes y conceptos previos.

4.1 Introducción

Una vez determinado desde el punto de vista termodinámico, el tránsito de un metal de su forma elemental a la combinada (corrosión), se hace necesario determinar la rapidez con la que se produce ya que esto nos indicará lo grave del proceso de corrosión y su impacto en la funcionalidad de la pieza. Esto permitirá actuar sobre aquellos factores que ralenticen dicho tránsito.

Esta velocidad de corrosión se puede medir indirectamente a través de una variable experimental: la intensidad (I) que circula por la pila. Teniendo en cuenta que dicho mecanismo es de naturaleza electroquímica, el proceso se rige según la ley de Faraday:

- Para disolver un equivalente electroquímico de metal se necesitan 96500 Culombios.
- Para disolver X gr se necesitan $I \cdot t$ (C).

Siendo I la intensidad de corriente que circula por la pila de corrosión y t el tiempo durante el cual funciona dicha pila. Los gramos de metal disueltos serán:

$$X = \frac{E_q}{96500} It$$

Y los gramos disueltos por unidad de tiempo (Velocidad de corrosión):

$$V_c = \frac{X}{t} = \frac{E_q}{96500} I$$

En donde se refleja la relación entre V_c y I.

Dado que en la práctica no será lo mismo la pérdida de 1 gr/día en una pequeña superficie (ejemplo: 1 cm²) lo que supondría un rápido desgaste de la pieza, que, en una más grande, se utiliza la relación V_c/S :

$$\frac{V_c}{S} = K \frac{I}{S} = Ki$$

Siendo i la densidad de corriente (I/S).

En una pila de corrosión es necesario que la intensidad en el cátodo y en el ánodo sean iguales, pero no así las superficies, que pueden ser diferentes, por lo que la intensidad tampoco tendrá por qué serlo:

$$S_A \neq S_C \rightarrow i_A \neq i_C$$

4.2 Polarización

La intensidad se calcula según la ley de Ohm:

$$I = \frac{E_c - E_a}{R}$$

Si E_c y E_a son los potenciales catódico y anódico y R la resistencia total del circuito

Además, donde R tiene dos componentes:

- **Electrónico:** Caída óhmica a través del metal cuando los electrones circulan desde el ánodo hasta el cátodo de la pila.
- **Iónico:** Resistencia del electrólito al movimiento de los portadores de carga (iones).

Habitualmente la resistencia electrónica es muy pequeña, ya que la conducción es fácil en el metal (sobre todo si ánodo y cátodo están próximos); en cambio, la resistencia iónica puede ser significativamente mayor, por lo que suele en la práctica determinar el valor de R .

Dado que el valor de R es relativamente sencillo de determinar, lo interesante será determinar E_c y E_a .

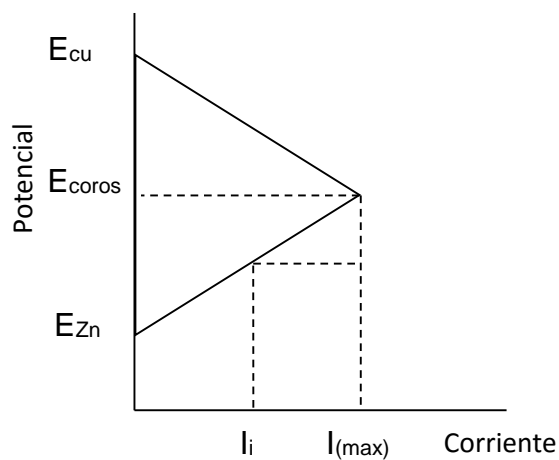


Figura 4.1. Representación gráfica de la relación entre potencial e intensidad (polarización) en una pila Daniell. Fuente: Uhlig H., *Corrosion and Corrosion Control*.

Debido a la polarización de ánodo y cátodo, estos potenciales no se corresponden exactamente con los de Nernst, si no que cuanto mayor es la I , menores tienden a ser los potenciales. En el límite, cuando $I=0$, E_c y E_a se corresponden con los de la ec. de Nernst. Esta relación entre E e I se determina según las funciones $f(E, I) = 0$.

Los factores que intervienen en la polarización son:

- Polarización de concentración o difusión (η_c).
- Polarización de resistencia (η_R).
- Polarización de activación (η_A).

Si estos factores se modifican disminuyendo las pendientes de las curvas de polarización, el equilibrio se alcanzará antes (menor I y V_c) y si se aumenta alguna de las pendientes tardará más en alcanzarse el estado estacionario (mayor I y V_c).

En cualquier caso, la diferencia de E será igual a $R \cdot I$. En el límite de máxima I , dado que siempre existirá R , los potenciales nunca podrán llegar a ser iguales a menos que no haya corrosión ($I=0$).

El potencial al que trabaja un metal que está sufriendo corrosión es un potencial aproximadamente intermedio al correspondiente a ánodos y cátodos en circuito abierto, conocido como potencial de corrosión (E_{corr}), potencial mixto o potencial mixto de corrosión.

El valor I_{max} se conoce como corriente de corrosión, I_{corr} . La velocidad de corrosión será proporcional a esta I_{corr} .

Antes de pasar al epígrafe siguiente se deben hacer algunas consideraciones sobre la polarización:

- La relación E/I no tiene por qué ser lineal.
- Las curvas de polarización no tienen por qué tener la misma pendiente. Habitualmente en circuito E_{corr} suele ser próximo al del cátodo (polarización más acusada en el ánodo), y en circuito cuando ocurre lo contrario.
- Cuando ánodo y cátodo están alejados y/o el electrólito es resistivo, los potenciales de ánodo y cátodo son muy diferentes y el potencial de

corrosión no queda definido. Se dice entonces que el sistema está bajo control de resistencia.

4.2.1 Polarización de concentración o difusión

Representa la variación en el potencial de un electrodo como consecuencia de los cambios de concentración en la inmediata vecindad de su superficie, y motivados por el flujo de corriente, que altera la composición del electrolito. La agitación y otras medidas que ayuden a uniformar la solución, disminuyen la polarización.

El movimiento de los iones se produce por: difusión, migración y convección. Difusión y migración son lentas en comparación con la convección.

En la capa contigua al material (espesor de hasta 0,2 -0,4 mm), capa de difusión, es sólo éste el proceso que se produce. Fuera de esta capa será mediante convección y migración (partículas cargadas).

La velocidad de difusión en esta capa es la que controla el alejamiento o acercamiento de las especies y por tanto las curvas de polarización y el valor de i_{corr} . Viene definida por la ec. de Fick:

$$V = K_D \frac{\Delta C}{\delta} AC = C_e - C_s$$

K_D : Coef. de difusión. Depende de la sustancia a transportar y su temperatura. Normalmente crece con la temperatura.

C_e : Concentración de oxidante en el cátodo. Aumenta con la agitación.

C_s : Concentración de oxidante en el ánodo. Disminuye con la agitación.

δ : Espesor de la capa de difusión. Disminuye con el aumento de la agitación.

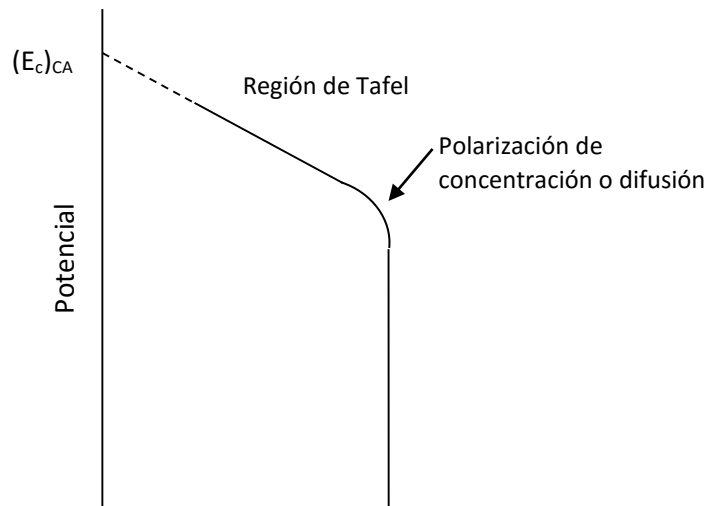


Figura 4.2. Cambio de pendiente de la curva de polarización catódica como consecuencia de la aparición de fenómenos de polarización de concentración.

Para una situación de $C_s=0$, no se puede aumentar más I , se consigue la máxima difusión. Aunque el potencial siga cambiando, I permanece constante, esto se refleja en la recta vertical de la figura 4.2.

La variación de potencial (polarización) se deduce de la ecuación de Nernst:

$$E_{conc} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C_e}{C_s}$$

Por lo que un aumento de concentración en el ánodo, ennoblece el electrodo (aumenta el potencial), pero un aumento en el cátodo reduciría su potencial. Esta es una de las razones por las que la curva anódica tiene pendiente positiva y la catódica negativa.

4.2.2. Polarización de resistencia

O polarización óhmica, se origina como consecuencia de cualquier caída óhmica (IR) adicional que pueda originarse como consecuencia del funcionamiento de la pila.

Suele estar causada por películas sólidas o precipitados localizados sobre la superficie metálica que se opongan al paso de corriente. Habitualmente se trata de productos oxidados. En casos extremos se pueden formar películas dieléctricas de óxido con polarizaciones de cientos de voltios.

También se puede producir en la capa de electrólito en la inmediata vecindad del electrodo.

Esta polarización se incrementa linealmente con el aumento de la densidad de corriente.

Afecta a la curva de polarización modificando ligeramente la zona de cambio de pendiente por polarización de concentración.

4.2.3 Polarización de activación

Se relaciona con la energía de activación necesaria para que la reacción de electrodo se verifique a una velocidad determinada, y aparece como consecuencia de la barrera de energía que debe salvar el electrón en el intercambio a través de la intercala electrodo/electrólito.

La velocidad de reacción es proporcional a la fracción de átomos, iones o moléculas cuyo contenido energético excede de determinado valor (energía de activación: "A"), ya que, si no, no se produciría la reacción. Según Maxwell y Boltzman, esta fracción (n) es igual a:

$$n = e^{-A/RT}$$

Donde R es la cte. de los gases y T la temperatura absoluta.

Como en una reacción electroquímica, el potencial del electrodo influye en la energía de activación, (y ésta cambia con el potencial) al polarizarse el electrodo, variará la energía de activación, por lo tanto, la velocidad de reacción y finalmente la densidad de corriente. Es decir, hay una interdependencia entre flujo de corriente y potencial.

Esto se dará en cualquier proceso de electrodo típico de la corrosión, tanto de reducción como de oxidación del metal. La polarización de activación es inherente a las reacciones de corrosión.

El proceso de polarización que se produce es el siguiente: la variación del potencial en uno de los electrodos induce al equilibrio de la reacción de dicho electrodo a desplazarse en el sentido de igualar dicho potencial, por lo que:

- En el ánodo, un aumento de potencial induce mayor oxidación (menor energía de activación y mayor potencial de equilibrio), y por lo tanto un n mayor, y mayor I (pendiente positiva de la curva).
- En el cátodo, menores potenciales induce mayor reducción, reducción de A , mayor n , mayor I (pendiente negativa de la curva).

El fenómeno cumple la siguiente relación lineal “corriente-potencial” descrita por Tafel:

$$\eta = a + b * \log i$$

Donde η es la polarización, i la densidad de corriente y a y b son ctes. La relación es válida para $i > 10^{-4}$ A/cm². Si $i < 10^{-4}$ - 10^{-6} A/cm², $\eta = a + bi$.

La región de activación o de Tafel en las curvas de polarización presenta tramos rectos en una representación semilogarítmica. Por tanto, en reacciones en las que sólo se presente polarización de activación, las curvas serán líneas rectas si se representa E frente a $\log(i)$.

4.2.4 Características generales de las curvas de polarización.

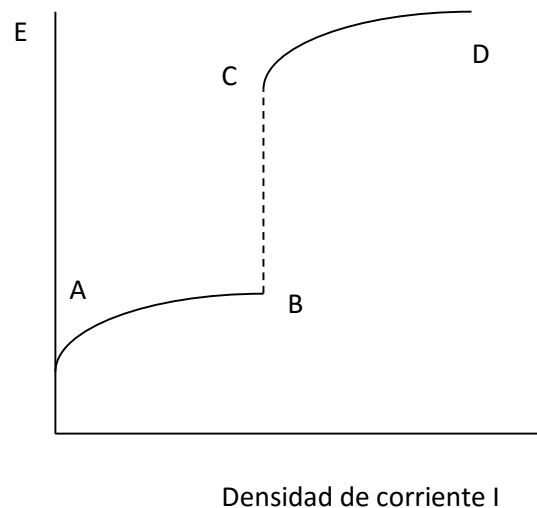


Figura 4.3 Trazado característico de las curvas de polarización anódica correspondiente a fenómenos de corrosión.

4.2.4.1 Ánodo

Si en una probeta de ensayo se van imponiendo potenciales cada vez mayores al ánodo, partiendo del potencial de Nernst para el equilibrio

$Me \leftrightarrow Me^{n+} + ne$, el equilibrio tiende a desplazarse hacia la oxidación y aparece una cierta intensidad (tramo A-B fig. 4.3).

Según va aumentando la densidad de corriente, aparecen fenómenos de polarización de activación (forma característica de la curva) hasta el punto B, en donde se alcanza la velocidad máxima de difusión (siempre y cuando no aparezca pasivación antes).

A potenciales superiores, si se alcanza el correspondiente a la oxidación del disolvente, de acuerdo con el equilibrio:

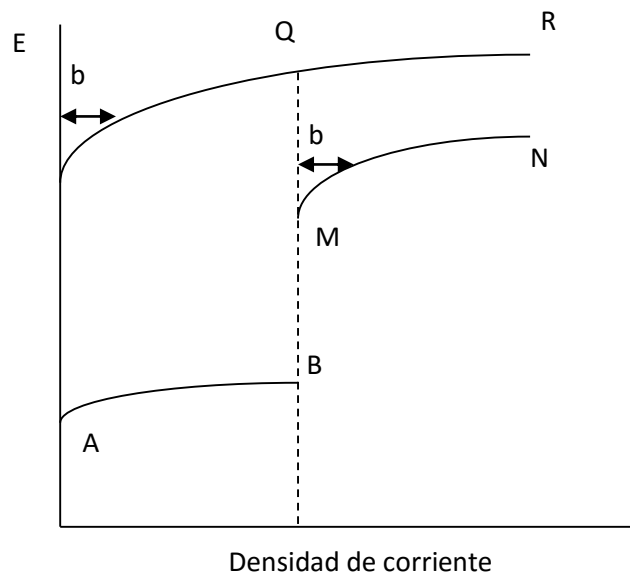
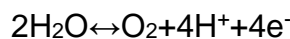


Figura 4.4 Curva de polarización anódica en la que se pone de manifiesto el carácter aditivo de las intensidades cuando tienen lugar varias reacciones de oxidación simultáneas.

La densidad de intensidad seguirá aumentando por la corriente originada por dicha reacción que tenderá a desplazarse hacia la oxidación por aumento del potencial impuesto (tramo C-D).

Si el metal se hubiese pasivizado, se registraría el tramo PQR (Fig. 4.4), es decir, sólo habría aportación de intensidad por la oxidación del agua.

4.2.4.2 Cátodo

Las reacciones más habituales de corrosión para metales activos son:

- La **reducción de O₂** en medios aireados a PH neutro o alcalino
- La **reducción de H⁺** en medios ácidos.

En general, las curvas de polarización mostrarán, análogamente a las del ánodo, una componente de polarización de activación, y a veces también de resistencia y/o concentración.

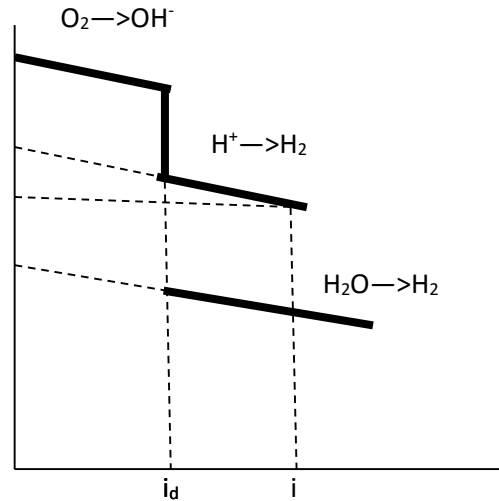


Figura 4.5. Forma general de la curva de polarización catódica que muestra la reducción de O_2 de protones o del disolvente a potenciales reductores.

Si el oxidante más fuerte es el O_2 (fig. 4.5), al ir aplicando potenciales cada vez menores desde el de equilibrio, la intensidad aumenta hasta alcanzar la velocidad límite de difusión (en el cátodo no aparece pasivación).

A menores potenciales, puede aparecer el desplazamiento en reducción de otros equilibrios (fig. 4.6):

- **Protón – hidrógeno:** Es necesario que el metal esté en contacto con una determinada concentración de H^+ . $H^+ \leftrightarrow H_2$
- **Otros oxidantes,** si los hubiera (poco probable).
- **Reducción del disolvente:** Sólo se da a potenciales suficientemente bajos. $2H_2O + 2e^- \leftrightarrow H_2 + 2OH^-$

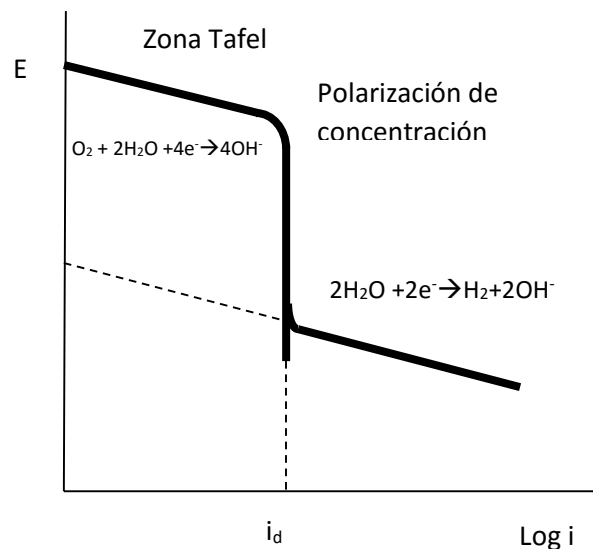
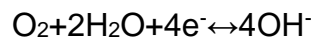


Figura 4.6. Trazado general de la curva de polarización catódica para un material metálico en contacto con un medio aireado a pH neutro o alcalino.

4.2.4.3 Mecanismo de la reducción de oxígeno

Es la reacción catódica típica de metales en medios acuosos en contacto con la atmósfera. La reacción global es:



Fases:

- a) **Difusión del Oxígeno:** Penetra en la capa límite para llegar al cátodo por difusión. La baja solubilidad del oxígeno en el agua frena la difusión. Esto reduce la concentración de oxígeno en el electrolito.
El oxígeno puede ser también transportado por convección, pero no por migración, debido a que, al no estar cargada eléctricamente, no es sensible al campo eléctrico. En cambio, los protones tienen una elevada difusión (poco tamaño y peso) y sufren migración, lo que hace que su velocidad de transporte sea mucho mayor.
- b) **Adsorción del oxígeno sobre la superficie de la región catódica.**
- c) **Reacción:** $O_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow H_2O$
- d) **Reacción:** $H_2O_2 + 2e^- \leftrightarrow 2OH^-$

Aquí, el alejamiento de los OH se produce por difusión en la capa límite.

Los protones se eliminan en forma de burbujas de gas, produciendo agitación del electrolito, reduciendo el espesor de la capa de difusión y aumentando la convección forzada.

Estas características de los diferentes pasos llevan a la pronta aparición de fenómenos de polarización por difusión (lento transporte del O₂) lo que produce la brusca pendiente de la curva de polarización catódica (Fig. 4.6).

4.2.4.4 Factores que afectan a la movilidad del oxígeno

- La primera barrera que ha de atravesar es la separación aire/electrolito. Debido a su baja solubilidad, la cantidad de oxígeno que lo hace es pequeña, pero debido a que habitualmente el área de la interfase es proporcionalmente mucho más grande que la de la chapa metálica, este efecto no suele ser importante.
- 2ª etapa: Movimiento del oxígeno por el electrolito. Mediante convección y/o difusión. Tampoco suele controlar el proceso. Lo que si influye es una baja concentración de oxígeno en la frontera de la capa límite.
- 3º: Exclusivamente por difusión, ha de atravesar la capa de difusión. Suele ser la que determine la velocidad de llega de oxígeno produciendo polarización por concentración.

4.2.4.5 Cálculo de i_d (leyes de difusión)

Sólo cuando la polarización por concentración pierde importancia, es decir tienen baja densidad de corriente y alta velocidad de suministro de oxígeno se cumple la ecuación de Tafel (polarización de activación, a aproximadamente 0,12V).

La densidad de corriente límite (i_d) debido a la polarización por difusión se puede calcular mediante las leyes de difusión:

Suponiendo que en el límite se reduce todo el O₂ que llega al cátodo:

Ley de Faraday=Ley de Fick

$$\frac{E_q}{F} i_d = \frac{D * C_0}{\delta} i_d = \frac{F * D * C_0}{\delta * E_q}$$

Donde:

F: Faraday

D: Coeficiente de difusión para el oxígeno

E_q : Equivalente electroquímico (Peso molecular del $O_2/4$)

C_o : Concentración de oxígeno en el electrólito y, por tanto, en el límite de la capa de difusión.

δ : Espesor capa límite de difusión.

Cuando la densidad de corriente tiende a i_d , la concentración de O_2 en la superficie del cátodo tiende a 0. Según la fórmula de Nerst, esto conllevaría a un rápido aumento de polarización y, por tanto, una rápida reducción de potencial:

$$E = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln C_i$$

En realidad, al llegar el potencial a ciertos valores aparecerían otras reducciones, por lo que el potencial no bajaría indefinidamente.

4.3 Pasivación

4.3.1 Concepto

Se entiende así la propiedad que presentan determinados metales y aleaciones de permanecer prácticamente inertes en determinados medios, en los cuales, de acuerdo con la termodinámica, deberían comportarse como metales o aleaciones activos y, por tanto, sufrir corrosión con velocidades de disolución altas, a través de los mecanismos electroquímicos habituales.

Diferentes definiciones a lo largo de la historia:

- **Primeras** documentaciones en **SXVIII**.
- **Schönbein 1836**: Primeros resultados de ensayos. Fe en HNO_3 . Lo definió como Pasivación.
- **Faraday**: Pila de platino y Fe en HNO_3 . Sugirió criterio en función de la magnitud de corriente en la pila.
- **Wagner**: Se considera pasivable si al aumentar el potencial del cátodo hacia valores más nobles, la velocidad de disolución es menor. Es decir, si al aumentar la concentración del agente oxidante, la velocidad de corrosión se reduce.

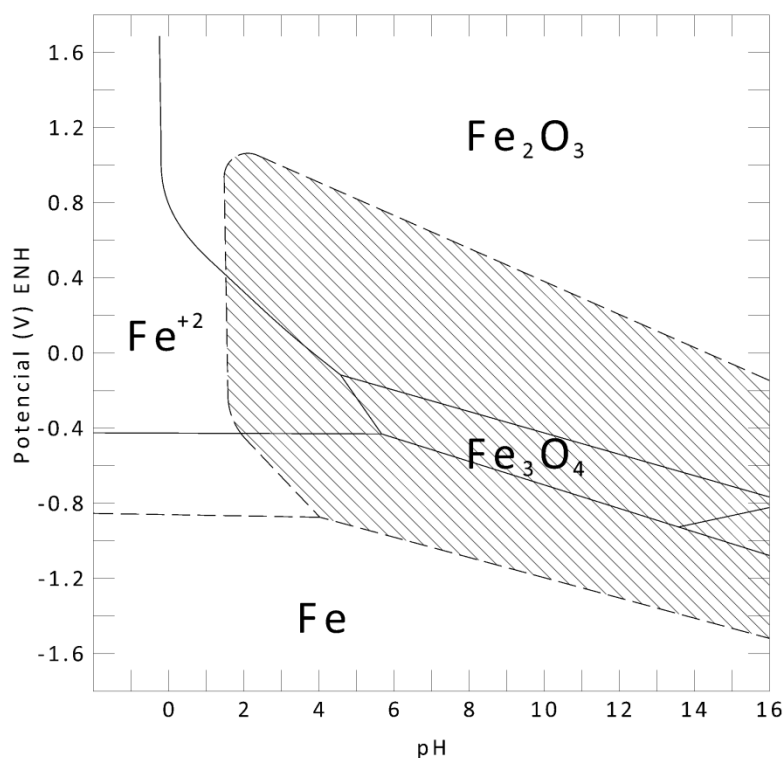
Caso más relevante: Acero inoxidable.

Figura 4.7. Extensión de la zona de pasividad superpuesta al diagrama de Pourbaix para el hierro en aceros inoxidables, y, en general, para aleaciones que basa esta propiedad en la formación de capas pasivas de Cr_2O_3 . Fuente: Jones, D.A.: Principles and Prevention of Corrosion.

Se llama acero inoxidable a la aleación Fe-Cr con una concentración de Cr de más del 12% en peso.

Su comportamiento en medios agresivos con el hierro sin alear se acerca al de un metal noble, pero a un coste muy reducido.

Se debe a que el Cr es capaz de pasivarse simplemente al entrar en contacto con la atmósfera, a pesar de no haber un potencial muy alto, y transfiere ese comportamiento a la aleación.

En la fig. 4.7 se muestra la zona de pasivación del acero inoxidable.

4.3.2 Mecanismos de pasivación.

Puede ser consecuencia de básicamente 2 fenómenos:

- Formación de una capa de productos oxidados que aísla el metal. Es el caso más habitual.
- Presencia de capas monoatómicas, generalmente de oxígeno, absorbidas sobre la superficie metálica.

4.3.2.1 Formación de la capa de metal oxidado

El proceso de formación de la capa puede empezar formando pequeños núcleos de producto oxidado pasivante, que luego crecerán extendiéndose a toda la superficie, o bien (caso de aceros inoxidable o las aleaciones de base níquel) formando simultáneamente una monocapa de óxido por toda la superficie. Esta capa formada estará constituida por una película de óxido mono o biatómica. Que se dé una u otra reacción dependerá de:

- Si hay condiciones oxidantes o si la reacción es con el oxígeno absorbido.
- Nivel de acidez del medio.

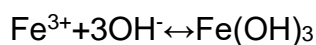
Es decir, dependerá principalmente del PH y del potencial. Además, pueden influir otros factores como la presencia de agua. Los mecanismos de formación en cada caso no siempre se conocen bien.

En el caso del Fe el proceso es el siguiente:

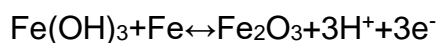
a) Caso oxidante:

Si en el electrolito hay cationes metálicos provenientes del ánodo Fe^+ y OH^- proveniente del cátodo se dan las siguientes reacciones:

Primero:



Y luego:

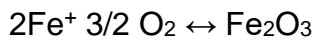


Si no hay cationes metálicos antes de la formación de óxido se produce la siguiente reacción:



b) Caso de la capa de oxígeno:

Si en el electrolito no hay cationes metálicos en el inicio (se forma óxido sin la reacción de corrosión) y la reacción química es entre el O₂ y el metal. La reacción es la siguiente:



4.3.2.2 Crecimiento de la capa formada

Una vez formada esa fina capa, ésta crece en espesor debido a fenómenos de migración iónica a su través, propiciado por el fuerte campo eléctrico generado entre sus extremos:

- Cara interior: Rica en catión (carga positiva)
- Cara exterior: Rica en anión (carga negativa)

La diferencia de potencial generada puede ser cercana a 1V. El campo generado produce un eficaz transporte iónico. Esto hará crecer a la película, disminuyendo el campo hasta alcanzarse un estado estacionario en el cual la velocidad de formación de la película se iguala a la velocidad de disolución de la misma en el medio.

El espesor de la capa se mide por medios elipsométricos (midiendo la alteración de la luz polarizada al reflejarse sobre la superficie) o eléctricos (Coulombimetría), que relaciona el espesor con el número de coulombios necesarios para reducir electrolíticamente la película pasiva. Los espesores son habitualmente del orden de nanómetros (10⁻⁹m).

4.3.2.3 Características de la curva de polarización anódica en materiales metálicos pasivables

Se imponen potenciales crecientes a un metal pasivable partiendo del correspondiente al equilibrio de Nerst, se obtiene la curva de polarización anódica correspondiente (Fig. 4.8).

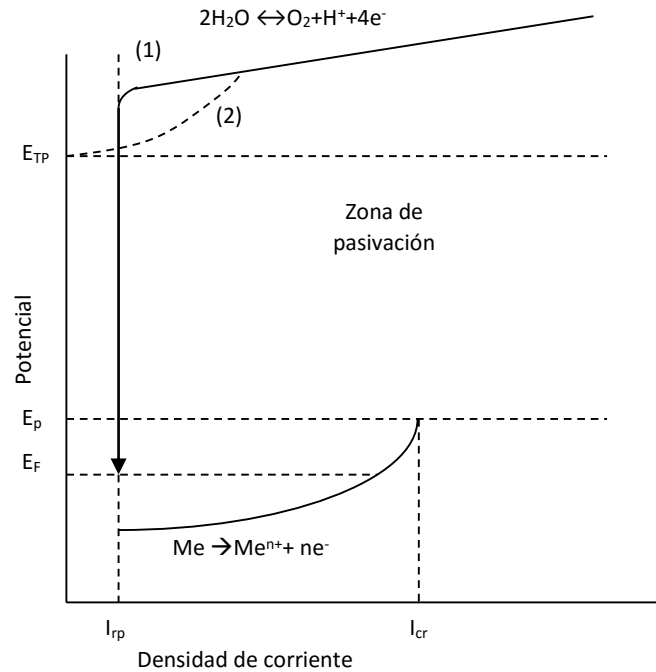


Figura 4.8. Trazado habitual de la curva de polarización anódica característica cuando se obtiene sobre un material metálico pasivable.

A diferencia del resto de metales, se observa:

- Para un determinado potencial (E_p) y antes de alcanzar el corriente límite por difusión, se produce una caída significativa de i hasta i_{rp} (corriente residual de pasivación). Esto se debe a la aparición de la capa pasivadora.
- Justo antes de la caída de i , a E_p se alcanza un máximo de i llamado densidad crítica de pasivación (i_{cr}).
- La película pasiva se mantiene estable (densidad al valor i_{rp}) en un rango de potenciales que es lo que se llama zona de pasivación.
- Si se sigue aumentando el potencial y la película pasiva es conductora, llega un momento en que debido a los altos potenciales se puede dar otra reacción de oxidación distinta que incremente otra vez la densidad de corriente.
- Si la capa no fuese conductora, no se podrían dar dichas reacciones, y teniendo en cuenta el alto campo eléctrico, se produce migración iónica, aumentando la capa pasiva. Esto se usa para mejorar la resistencia a medios agresivos de ciertos materiales.

- Antes de alcanzar el potencial de las nuevas reacciones, se puede dar el caso de que se empiecen a registrar ciertos aumentos de densidad tomando la curva el trazado (2). Este fenómeno se llama transpasivación.
- Potencial de Flade (E_f): Al trazar la curva de retorno reduciendo progresivamente el potencial, al llegar a E_p , no se produce el aumento de i esperado, si no que éste se produce a un potencial ligeramente inferior (E_f). Esto se debe a impedimentos cinéticos en el proceso de disolución de la película y depende fundamentalmente de las características de la propia película y del medio. Por tanto, la zona estable de la película una vez formada se extiende de E_{TP} y E_f .

Potenciales de Flade positivos (cromo, aceros inox, etc.) denotan condiciones favorables para la pasivación. Potenciales negativos (hierro, acero al carbono, etc.) indican poca estabilidad de película.

4.3.2.4 Pasivación en condiciones reales de operación. Selección de materiales metálicos resistentes a la corrosión electroquímica.

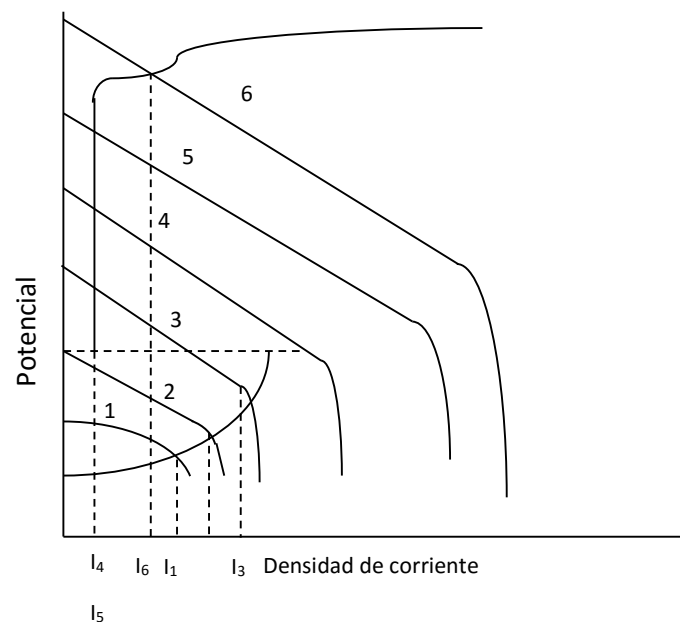


Figura 4.9. Comportamiento a la corrosión de un material metálico pasivable en contacto con medios de distinto carácter oxidante.

Considerando una aleación con una curva de pasivación como la de la fig. 4.9, podrá darse lugar a los siguientes casos según el tipo y la concentración de oxidante presente:

- Partiendo del caso de potencial más bajo (1), según éste aumenta (medio más oxidante), la i aumentaría (2).
- A partir de un cierto nivel, esta tendencia se rompería, ya que la curva catódica cortaría a la anódica sólo en la zona de pasivación (4), por lo que la única posibilidad sería i_{rp} . Se formaría una capa pasiva estable.
- Si la capacidad oxidante del medio sigue aumentando, la i seguiría cte. (5).
- Llegado un cierto nivel de oxidación (6), las curvas se cortarían en la zona de transpasivación, con lo que la i volvería a aumentar según debido a la solubilidad de los productos en el medio.
- Entre los casos 2 y 4, las curvas presentarían dos puntos de corte, uno a mayor potencial en la zona de pasivación y otro en la zona de actividad:
 - Si el metal entra en contacto con el medio ya pasivo, esta condición se mantendría con la i correspondiente.
 - Si no, el metal se comportaría de forma activa a i_3 . No se podría formar la capa pasiva.

4.3.2.4 Sumario

Una vez realizado el estudio, se puede concluir que:

- La velocidad de corrosión puede ser menor en un medio más oxidante que uno menos oxidante.
- Para una operación adecuada, debe elegirse una aleación tal que opere entre el potencial de pasivación y el de transpasivación.

4.3.2.5 Selección del material

El proceso de selección, desde el punto de vista científico, se lleva a cabo analizando la curva de pasivación de cada material y comparándolas con la del medio dónde ésta va a operar y asegurarse de que trabajaría a un potencial entre el de pasivación y el de transpasivación.

En caso de que haya varios materiales que cumplan el requisito, se elegiría el de menor i_{rp} .

A parte habría que tener en cuenta consideraciones de tipo económico sobre el precio de los distintos materiales disponibles.

4.3.2.6 Influencia de algunas variables sobre las características de las curvas de pasivación

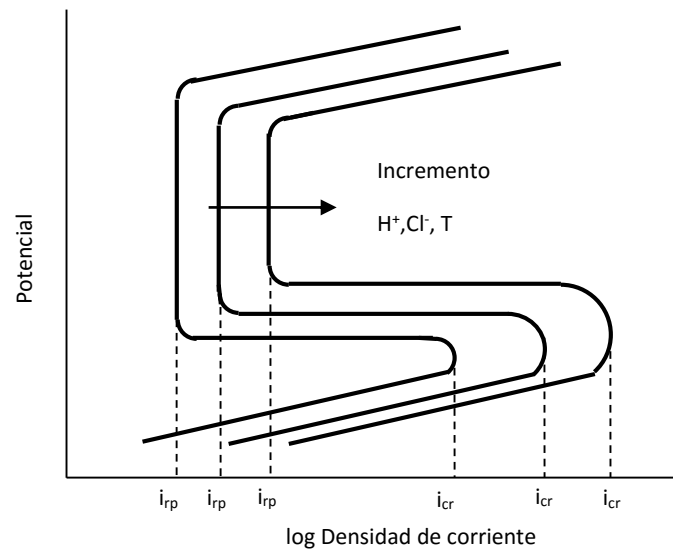


Figura 4.10. Modificaciones en la curva de pasivación al cambiar las concentraciones de protones, cloruros o la temperatura de operación.

La fig. 4.10 muestra la tendencia general de los cambios que se observan en el trazado de la curva de pasivación para un determinado material metálico cuando aumentan: **T^a, H⁺ o Cl⁻**.

- Aumento de i_{cr} , lo que puede conllevar aumento de velocidad de corrosión al trabajar en zona activa.
- Aumento del potencial de pasivación y disminuye el de transpasivación. Es decir, disminuye el rango de potenciales, y por tanto el número de medios, en los que la capa pasiva es estable.
- Aumenta i_{rp} , por lo que la velocidad de corrosión en situación pasiva del metal aumentará también.

Además, la presencia de Cl⁻ puede provocar roturas locales de la película pasiva (ataque localizado).

En cuanto al H⁺, para fenómenos de reacción catódica de reducción de H⁺, el potencial dependerá de la sobretensión para la descarga de hidrógeno. A baja sobretensión la capa pasiva tenderá a ser estable, pero a altas sobretensiones perderá esa estabilidad.

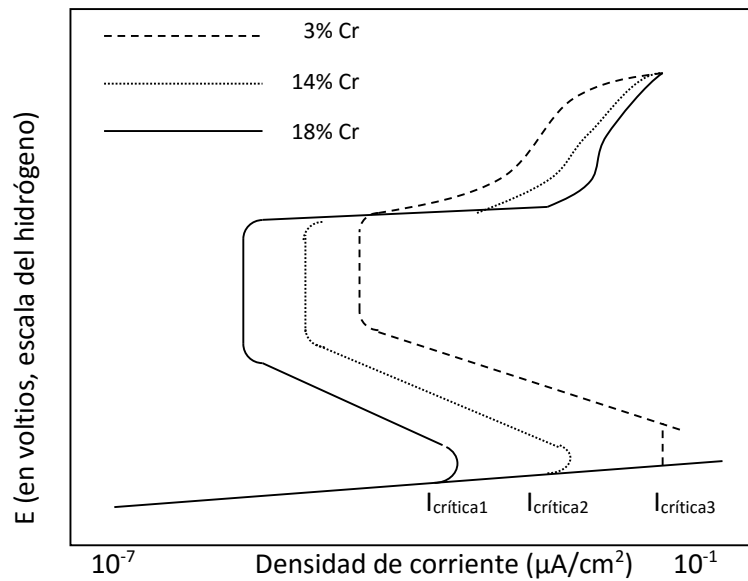


Figura 4.11. Efecto del contenido de Cr de aleaciones Fe-Cr en contacto con H_2SO_4 sobre el trazado de la curva de pasivación. Fuente: Zaki Ahmad. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*.

Otro factor importante es la composición del material metálico, fundamentalmente en cuanto a la proporción en que entra en la aleación el elemento aleante responsable de la formación de la capa pasiva. La fig. 6.8 muestra la influencia del contenido en Cr, en aleaciones Fe-Cr, en contacto con ácido sulfúrico al 10% en peso, en el trazado de la curva de pasivación.

El efecto es similar en algunos aspectos al de los otros factores. Así, ante un aumento de la concentración:

- Reducción de i_{rp} e i_{cr}
- Puede o no (caso del ejemplo) modificar el intervalo de potenciales estables de la capa pasiva.

También hay variables relacionadas con algunas características del electrólito. Por ejemplo, un aumento de temperatura suele reducir el margen de potenciales en los que la capa pasiva es estable y aumentar los valores de i_{cr} .

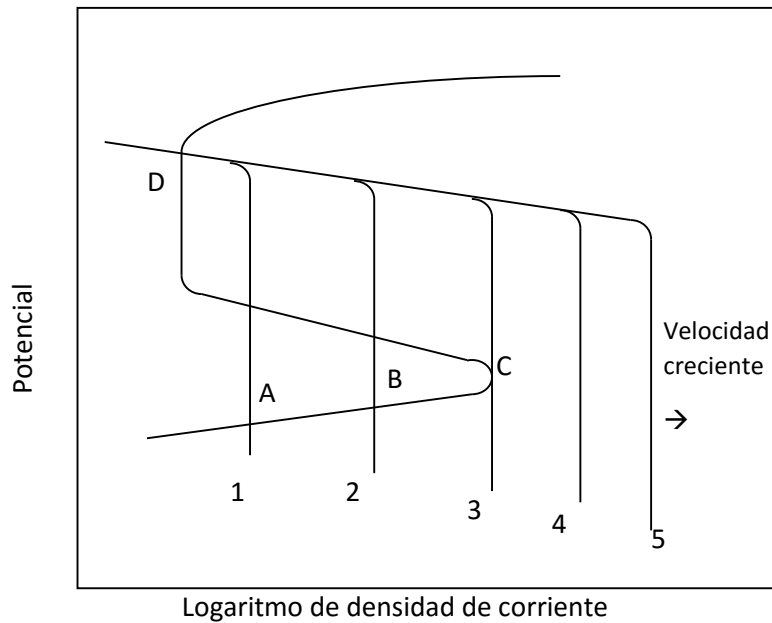


Figura 4.12. Efecto de la velocidad de circulación del electrolito, en un sistema bajo control difusional, sobre la estabilidad y/o la capacidad del material para formar capas pasivas en ese medio. Fuente: Zaki Ahmad. *Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control*.

La velocidad de circulación del electrolito respecto a la superficie metálica no modifica la forma de la curva anódica del material pasivable, pero sí puede condicionar el que la capa pasiva se genere o no, o se mantenga estable si se ha formado previamente. La fig. 6.9 muestra el posible trazado de las dos curvas de polarización de un sistema bajo control difusional con un material metálico pasivable. En este caso, el material no sería capaz de formar una capa pasiva estable, aunque sí mantenerla para bajas velocidades (1, 2 y 3). En cambio, a mayores velocidades (4 y 5) sí formaría una capa estable.

4.3.3 Repasivación

La repasivación es el fenómeno por el cual, en un metal que trabaja a potenciales entre el de pasivación y transpasivación, se produce la regeneración de la capa pasiva luego de que ésta se haya roto. Esta rotura puede producirse por golpeo o por efecto de algún anión agresivo.

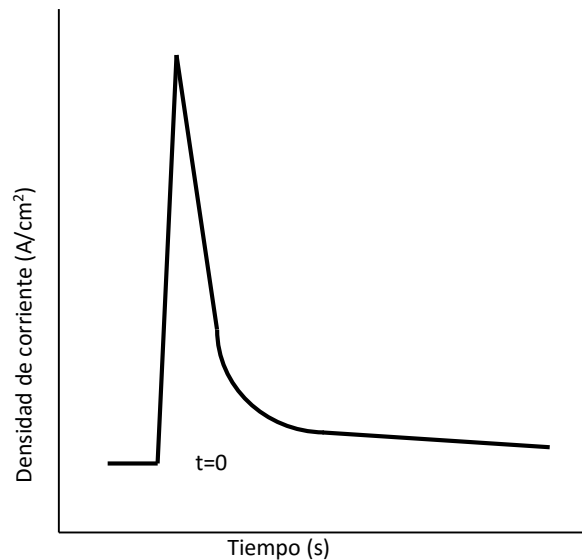


Figura 4.13. Respuesta del sistema en densidad de corriente frente a tiempo cuando se produce la destrucción de la película pasiva y su posterior reformación (repasivación). Fuente: González, J.A.: *Control de la corrosión. Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas*.

Si se registra la respuesta de corriente desde la destrucción de la capa ($t=0$; gran incremento de i) hasta su regeneración (i_{rp}), obtenemos una gráfica como la de la fig. 4.13.

Esta función responde a un modelo hiperbólico del tipo:

$$i = At^b$$

Siendo:

i : densidad de corriente

t : tiempo

A y b : ctes propias del sistema metal-electrólito.

El interés de su estudio se debe al hecho de que una repasivación más lenta dará lugar a mayor probabilidad de fenómenos de ataque localizado. La cte b (velocidad de repasivación), se puede representar en gráficas logarítmicas como una recta. Valores de -1 se considerarán rápidos y valores próximos a $-0,5$ pueden dar lugar a picaduras y otros ataques localizados.

4.3.3.1 Rotura local de la película pasiva

Los siguientes aniones agresivos (F^- , Cl^- , Br^- , I^- , etc.) son capaces de romper localmente las películas pasivas gracias a su gran elasticidad,

deformándose y penetrando a través de la red reticular de óxido que constituye la capa pasiva, en zonas en que ésta presenta alguna irregularidad o defecto estructural (inclusión no metálica en la superficie, compuesto intermetálico o un límite de grano con mayor desorden atómico) que impide un crecimiento totalmente coherente de la capa en esa zona.

La entrada del anión agresivo distorsiona la estructura reticular del óxido y, debido al reducido espesor de la capa, establece canales de comunicación entre el metal y el medio. Surge entonces una pila activa-pasiva, entre la región carente de película pasiva (pequeña superficie) y el resto de la superficie metálica. Las diferencias de potencial son del orden de 600 – 700 mV y la i del orden de 1 A/cm². Esto da lugar a un ataque severo, muy localizado, conocido como corrosión por picadura.

El caso más habitual, por su abundancia en la naturaleza, es el Cl⁻ (entornos marinos), los demás sólo aparecerán en determinados procesos químicos de la industria química.

4.4 Corrosión galvánica

Se entiende como corrosión galvánica o bimetálica la que tiene lugar entre dos metales disimilares en contacto eléctrico en un medio agresivo y el ataque preferente de una fase activa respecto de otra más noble presentes en una aleación.

| Corrosión de hierro (mg) | Segundo metal | Corrosión del segundo metal (mg) |
|--------------------------|---------------|----------------------------------|
| 183,1 | Cobre | 0,0 |
| 181,1 | Níquel | 0,2 |
| 171,1 | Estaño | 2,5 |
| 183,2 | Plomo | 3,6 |
| 176,0 | Tungsteno | 5,2 |
| 153,1 | Antimonio | 13,8 |
| 9,8 | Aluminio | 105,9 |
| 0,4 | Cadmio | 307,9 |
| 0,4 | Cinc | 688,0 |
| 0,0 | Manganeso | 3104,3 |

Tabla 4.1. Datos de corrosión del hierro formado por galvánico con distintos metales en contacto con una solución NaCl al 1% en peso.

En estos casos, la fase activa sufre más corrosión que si estuviese aislada y la fase de comportamiento más noble sufre menos corrosión. (Ver tabla 4.1) En el caso de materiales con potenciales similares no modifican apreciablemente su nivel de corrosión, ya que se consideran necesarias unas mínimas diferencias de potencial (en el caso del acero 100-130 mV) para que el efecto galvánico sea considerable.

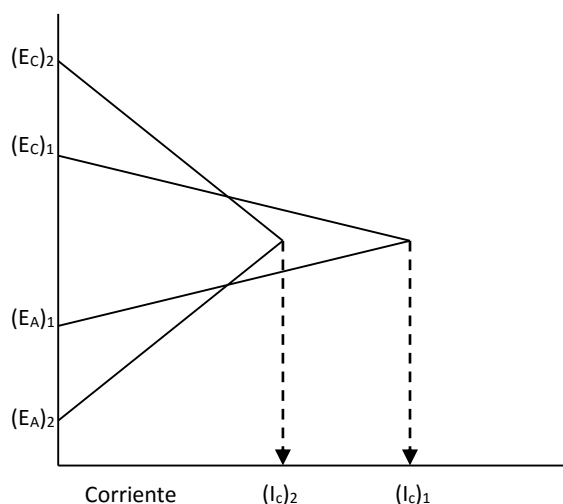


Figura 4.14. Influencia de las pendientes de las curvas de polarización sobre la intensidad de corrosión en fenómenos de corrosión galvánica.

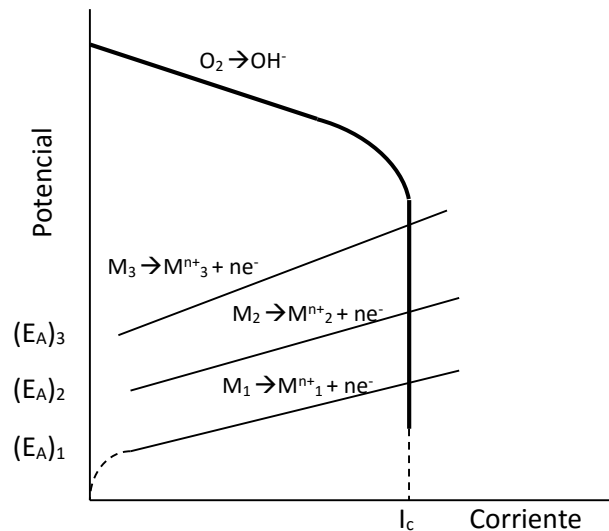


Figura 4.15. En sistemas bajo control catódico el tipo de par galvánico no influye de forma relevante en la intensidad de corrosión y, por tanto, en la velocidad de corrosión de metal de comportamiento anódico.

Es importante tener en cuenta que la velocidad de disolución no se puede predecir sólo a partir de la diferencia de potenciales catódico y anódico, sino que también es necesario tener en cuenta las pendientes de las curvas de polarización (fig. 4.14).

Para reacciones bajo fuerte control catódico (ej: reducción de oxígeno), la intensidad de corrosión puede ser la misma o muy similar, para metales de diferentes potenciales anódicos (fig. 4.15).

También puede producirse corrosión galvánica, aunque los metales no se encuentren en contacto directo (ej: cationes de Cu^+ disueltos que se depositan en superficies galvanizadas). Cuando baja la concentración de Cu^+ , los depósitos forman una pila galvánica que corroe el zinc del galvanizado. Fig. 4.16).

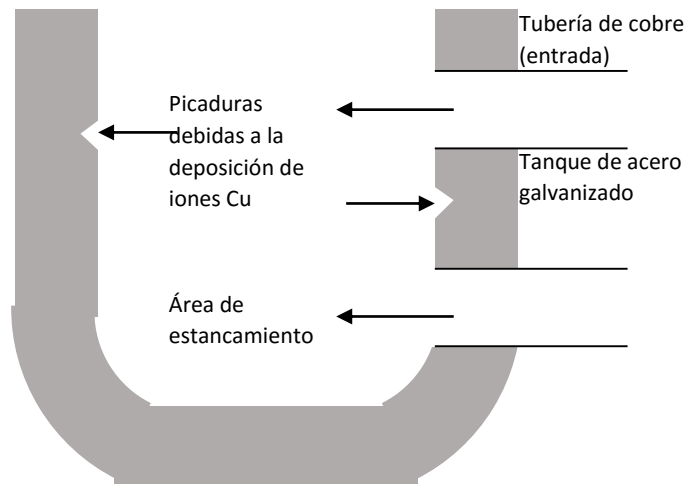


Figura 4.16. Corrosión galvánica en un tanque de acero galvanizado que lleva acopladas dos tuberías de cobre, en contacto con agua caliente. El ataque aparece lejos de la unión bimetalica. Fuente: Z. Ahmad. *Principles of Engineering and Corrosion Control*.

Otra posibilidad es la formación de macropilas sobre la superficie de un mismo material simplemente porque éste lleva más tiempo expuesto al medio (Ej: colocación de un tramo de tubería nuevo) que ha generado una capa de productos de la corrosión que aumenta el potencial de corrosión en esa zona respecto a las zonas nuevas (Fig. 4.17).

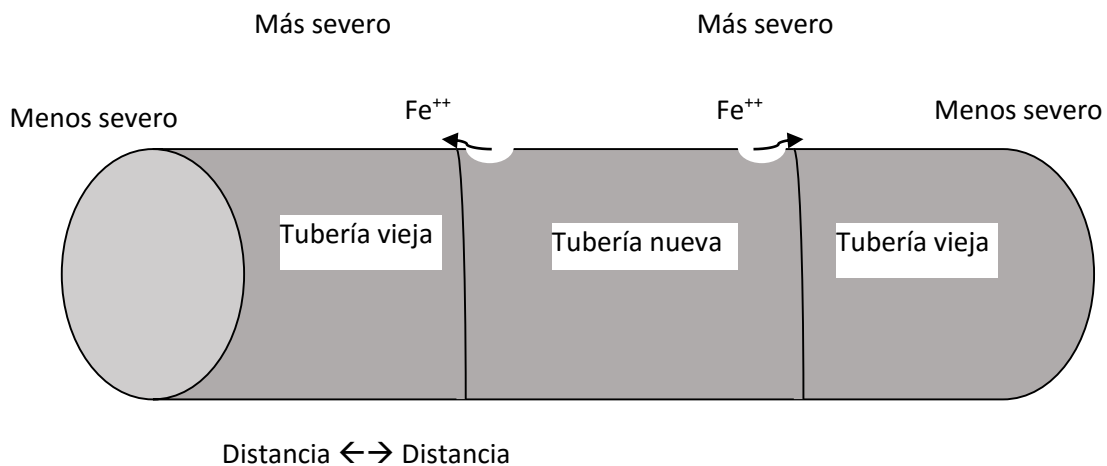


Figura 4.17. Formación de un par galvánico, al acoplar una tubería nueva a tubería vieja de acero al carbono. El ataque se localiza sobre el tramo de tubería reciente.

4.4.1 Extensión de la pila galvánica

La pila galvánica se extiende a partir de la cara de contacto entre ambos metales o fases del metal, tanto más cuanto mayor es la diferencia de potencial entre ambos metales y cuanto mayor es la conductividad del electrólito.

Es decir, es necesario que se cierre el circuito electroquímico entre sus extremos, por lo que cuanto mayor sea la diferencia potencial más se extenderá la corrosión. También cuanto más conductor sea el electrolito, más lejos llegará la corrosión.

Las zonas fuera de esta influencia, desarrollarán mecanismos de corrosión independientes.

4.4.2 Factores que influyen en la cinética de corrosión en fenómenos de corrosión galvánica

1. Nivel de polarización de la reacción catódica

En los casos en los que aparece la reducción de oxígeno, la cinética de corrosión viene determinada casi exclusivamente por el trazado de la curva de polarización catódica, y especialmente por las zonas de activación y difusión (fig. 4.16).

No obstante, hay que recordar que valores iguales de intensidad de corrosión suponen diferentes velocidades de corrosión según los valores de equivalente electroquímico.

Cuando se trata de fenómenos de corrosión ácida, es factor determinante cuál sea el metal de comportamiento catódico debido a los diferentes valores de sobretensión de cada uno.

2. Relación de áreas ánodo-cátodo

Es un factor fundamental. La unión de un ánodo de pequeña área en relación al cátodo, da lugar a mayores velocidades de corrosión.

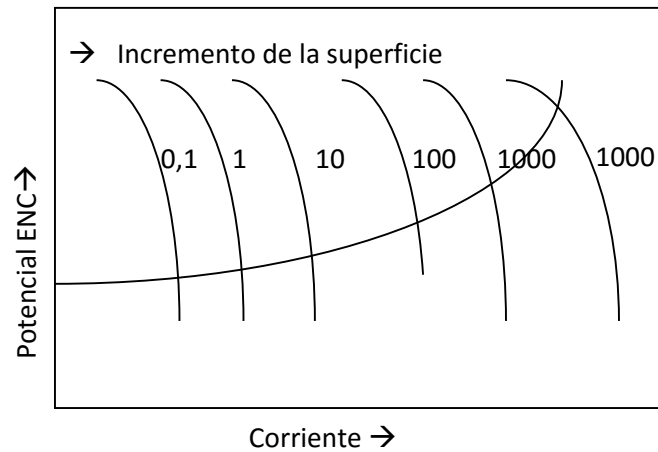


Figura 4.18. Efecto de la relación de áreas sobre la cinética de corrosión en fenómenos de corrosión con reacción catódica de reducción de oxígeno. Fuente: Jones, D.A. *Principles and Prevention of Corrosion*.

Se debe a que el aumento de la superficie catódica prolonga la zona recta de la curva de polarización (zona de activación o de Tafel), por lo que los efectos de concentración aparecen a una mayor i (Fig. 4.18).

Por esto, siempre que sea inevitable poner en contacto metales similares, debe cuidarse que la relación de áreas sea siempre favorable al ánodo y no al revés.

Así, sería razonable unir chapas de acero con remaches de cobre o aleaciones de base cobre, pero no unir chapas de estos últimos materiales con remaches de acero, pues la corrosión del remache sería muy severa.

3. Posible presencia de películas estables de productos oxidados sobre las superficies anódica y/o catódica

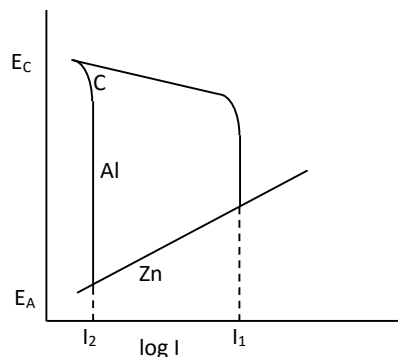


Figura 4.19. Influencia de la posible formación de capas estables de productos oxidados sobre la superficie en fenómenos de corrosión galvánica para los pares galvánicos Zn-Cu y Zn-Al.

En la fig. 4.19 se muestra un diagrama de Evans para los pares Zn-Cu y Zn-Al en un medio de PH neutro o negativo. Debido al carácter noble del cobre, éste no tiende a formar capas oxidadas, pero en el caso del aluminio sí, dando lugar a Al_2O_3 de forma estable en cuanto éste entrase en contacto con el aire por reacción con O_2 .

Esta capa introduce fenómenos de polarización de difusión en la reacción de electrolización del oxígeno, reduciéndose la velocidad de corrosión desde i_1 a i_2 . Además, esa capa produciría fenómenos de polarización de resistencia generando una mayor caída óhmica en el circuito.

4.4.3 Fenómenos de corrosión galvánica derivados de aspectos microestructurales

Cuando en una aleación aparecen varias fases y éstas presentan composiciones distintas, pueden aparecer problemas de ataque selectivo de corrosión galvánica sobre la fase más activa.

Habitualmente este ataque se produce en la zona más cercana a la interfase y afecta a la fase más activa.

Algo similar ocurre cuando aparecen intermetálicos en el seno de una fase matriz. Si el intermetálico constituye la parte activa, su disolución genera una pequeña cavidad que puede propiciar incubación de picaduras. Si la fase matriz presenta menor potencial, el ataque se produce en la periferia del intermetálico.

4.4.4 Protección catódica por ánodos de sacrificio

Se trata de la formación de un par galvánico intencionado. La idea es poner en contacto eléctrico la estructura metálica que se pretende proteger con un metal más activo, que actuaría de ánodo en la pila galvánica, disolviéndose y obligando a la citada estructura a actuar como cátodo, de manera que no sufra deterioro.

La cantidad de ánodos por unidad de superficie de la estructura se calcula en función de:

- Diferencia de potenciales electroquímicos entre estructura y ánodos de sacrificio.
- Conductividad del electrolito (extensión de alcance de la pila).

Para la protección del acero, caso más habitual, se utilizan fundamentalmente ánodos de Al o de Zn, si el electrolito es medianamente conductor (agua dulce o salada), y Mg (mayor par bimetálico) en medios resistivos (ej: el suelo para el caso de una tubería enterrada).

La estructura estará adecuadamente protegida cuando toda ella opere a un potencial inferior al de equilibrio de disolución del metal a proteger (de Nerst). En estas condiciones la estructura operará a valores de potencial que la situarán en la zona de inmunidad termodinámica del correspondiente diagrama de Pourbaix.

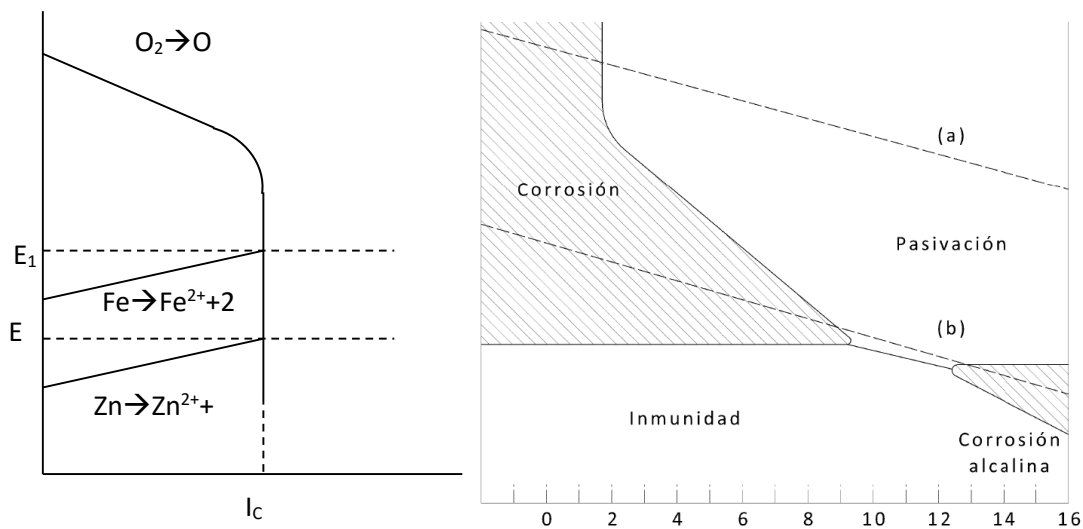


Figura 4.20. Diagramas de Evans y Pourbaix, que muestran la disminución del potencial al que operan una estructura de acero en contacto con un medio acuoso, cuando se unen eléctricamente a ánodos de Zn, hasta situar al potencial de corrosión en la zona de inmunidad del correspondiente diagrama de Pourbaix.

4.4.5 Ejemplo para el casco de un barco (Fig. 4.20)

Para el casco de acero de un buque navegando en un PH 7 con un potencial E1, lo que lo situaría en la zona de corrosión, soldando un cierto número de ánodos de Zn, el potencial del casco pasa a ser E2, por lo que la estructura quedaría inmunizada.

Esta protección también se puede lograr mediante un mecanismo de corrientes impresas, que consiste en conectar una fuente de corriente continua

y conectando en el polo positivo ánodos, normalmente de un material conductor barato, cuya única función es dispersar la corriente necesaria para polarizar la estructura a proteger hasta que alcance un valor de potencial que la sitúe en la zona de inmunidad del correspondiente diagrama de Pourbaix. Es decir, la diferencia de potencial ahora se genera mediante corriente continua.

4.4.5.1 Series galvánicas

Es habitual encontrar tablas de series electroquímicas de potenciales normales para los diferentes sistemas metal/catión de acuerdo con sus tendencias a la reducción u oxidación referidos al sistema H^+/H_2 y suponiendo la actividad unidad del catión.

Sin embargo, estas series son poco útiles en la práctica debido a:

- Difícilmente el metal aparecerá en contacto con un electrólito que contenga sus iones a una actividad unidad.
- Industrialmente, lo habitual es utilizar aleaciones y no metales puros.
- Conviene disponer de potenciales tanto para el caso de superficie limpia (condiciones activas) como cuando aparecen capas pasivas (pasivos)

Por ello, lo habitual es usar “Series galvánicas” que, aunque con cierta imprecisión, son muy útiles para conocer el comportamiento anódico o catódico de los materiales metálicos cuando forma un par galvánico en un medio agresivo.

En estas series se refieren a un medio concreto (en unas condiciones determinadas como temperatura, salinidad, etc.), y muestran los distintos materiales de interés industrial ordenados según su tendencia a la disolución tanto pasivados como sin pasivar.

4.4.5.2 Inversión de polaridad

La diferencia de potencial entre dos materiales puede cambiar, no sólo de magnitud, sino también de signo.

Ejemplo:

En el par Zn-Fe, el Zn tiende a comportarse anódicamente protegiendo al hierro. En esta situación, la oxidación del Zn forma $Zn(OH)_2$, una substancia

blanquecina que no se adhiere a la superficie metálica, por lo que no forma capa pasivadora a T^a ambiente.

A temperaturas superiores a 60°C, la reacción forma ZnO, una sustancia negruzca y compacta, eléctricamente conductora, que eleva su potencial, haciendo que ahora el ánodo sea el Fe.

4.5 Corrosión por picadura

Es el fenómeno más localizado. El ataque se centra en no mucho más del 1% de la superficie total, sin embargo, esto no le resta importancia debido a lo afectada que queda la zona, incapacitando la estructura.

Estos fenómenos localizados suelen aparecer por heterogeneidades del electrolito o de la superficie metálica, en donde el ánodo presentará una superficie pequeña respecto a la del cátodo. Estas heterogeneidades pueden ser macroscópicas o microscópicas.

4.5.1 Factores que propician el inicio o incubación de la picadura

a) Factores macroscópicos

- **Pilas de aireación diferencial:** Se da en el caso de electrolización de oxígeno en el cátodo. La zona mal aireada se constituye en el ánodo. Si la relación de áreas es muy favorable al cátodo, las densidades anódicas (y por tanto la velocidad de corrosión) serán elevadas.
- **Disolución fase activa minoritaria:** Debido a la aparición en superficie de regiones de pequeña superficie de una fase de menor potencial de reducción que el resto de fases, se produce la disolución selectiva de la fase minoritaria (fase activa).

b) Factores microscópicos

Las condiciones en que se dan más habitualmente son:

- Metales pasivables de alta resistencia a la corrosión
- PH cercano a la neutralidad
- Condiciones de estabilidad de la película pasiva
- Presencia de aniones agresivos (Cl⁻, F⁻, I⁻, Br⁻, etc.)

Así, se produce la rotura local de la película pasiva por efecto del anión. Parece deberse a la capacidad de deformación de los aniones que les

permite distorsionar la capa, especialmente si ésta presenta defectos debido a discontinuidades superficiales del metal, creando canales de comunicación entre el metal y el medio agresivo.

En estas condiciones se forma la pila activa-pasiva, entre la zona desnuda y la región con capa estable. La relación de áreas favorece una alta velocidad de corrosión.

4.5.2 Mecanismo de progreso de la picadura

Una vez iniciada la cavidad, en el interior de la misma se dan condiciones electroquímicas que difieren de las correspondientes en la superficie del material, facilitando el progreso del ataque hacia el interior (Ver fig. 9.5).

Los cationes que salen de la red metálica en el interior de la cavidad, se incorporan al electrolito a través de la reacción:

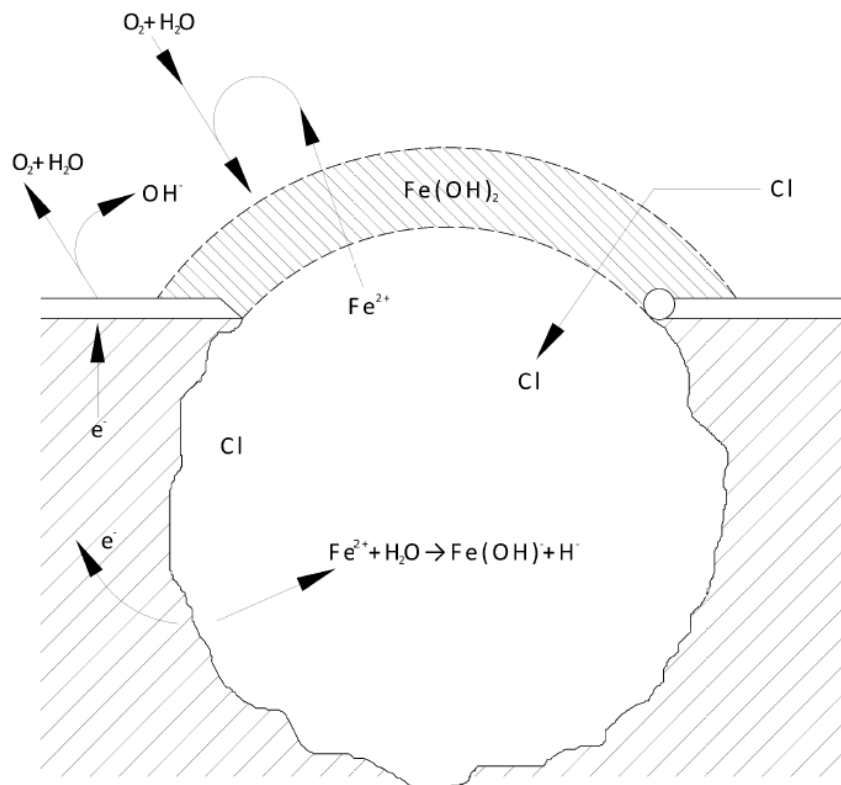
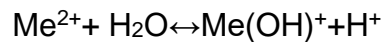


Figura 4.21. Representación esquemática del mecanismo de corrosión por picadura en el acero. Fuente: Jones, D.A. Principles and Prevention of Corrosion.

Estos cationes son fácilmente hidrolizables (reacción para metales divalentes):



La reacción puede repetirse con el ion producido.

Esto supone una acidificación local en la cavidad muy superior a la del electrolito original, lo que sitúa a la región fuera de la zona de pasividad, y la lleva a la zona de corrosión ácida. Esto supone que, aunque se pudiese regenerar la capa en la superficie, una vez iniciado, el proceso prosigue hacia el interior.

La presencia de otros aniones distintos al agresivo puede inhibir o favorecer el proceso. En general, los aniones provenientes de ácidos débiles, tienden a reducir la acidez y por lo tanto favorecer la formación de la capa pasiva. La presencia de iones de ácidos fuertes, favorecería la corrosión, aunque puede haber excepciones.

Otros factores que favorecen la corrosión por picadura son:

- Presencia de derivados del azufre que pueden formar H_2S en la superficie, y es muy agresivo.
- Aumento de Cl^- en la cavidad por migración debido a la elevada concentración de iones con carga positiva (cationes y protones). Esto reduce la solubilidad del oxígeno, evitando la repasivación del metal en el interior de la cavidad.

4.5.3 Potencial de picadura

Además de la presencia del anión agresivo y de la acidificación por hidrólisis como elementos necesarios para el inicio y continuidad de la corrosión por picadura, esto no es suficiente para que ésta siga avanzando hacia el interior.

Además, se requiere que el material metálico opere a un potencial superior a un cierto valor crítico (E_p^* : Potencial de picadura). Si el material trabaja por debajo de este potencial, la picadura pierde su actividad y deja de progresar.

4.5.4 Factores que afectan al potencial de picadura

- a) **Tipo de anión agresivo:** Favoreciendo más la corrosión, por ejemplo, el Cl^- que el Br^- o I^- .

- b) **Concentración de anión agresivo:** En general, el aumento de la concentración del anión disminuye el potencial de picadura, siguiendo una expresión como:

$$E_p = A - B * \log C^{\text{anión}}$$

Siendo A y B constantes que dependen de las otras dos variables del proceso (tipo de anión y composición del material)

- c) **Composición del material metálico:** Así, por ejemplo, en el Fe-Cr, un aumento de la concentración de Cr conlleva un aumento del potencial de picadura.

Siguiendo el ejemplo, un acero con un potencial de picadura superior al de reducción de oxígeno en el medio considerado, no tendrá problemas de corrosión por picadura.

- d) **Presencia de más de una fase:** En el caso de haber varias fases en un material, el potencial de picadura sería diferente para cada fase. La nucleación y desarrollo de picaduras, tendrá lugar antes sobre la fase débil (menor valor de PRE). Estas diferencias entre fases se deben a la diferente distribución de elementos como Cr, Mo, Si, ...

- e) **PH, temperatura y geometría de la superficie:** El PH actúa condicionando el nivel de acidificación de la cavidad; la temperatura influye en la estabilidad de la capa pasiva y en los valores de potencial según la ley de Nernst; y las irregularidades geométricas en la superficie pueden propiciar la concentración local de anión agresivo.

4.5.5 Concepto de potencial de picadura

Debido al bajo PH en la cavidad, habitualmente la reacción de reducción en la vecindad del vértice cambia de la electrolización a la de formación de H₂.

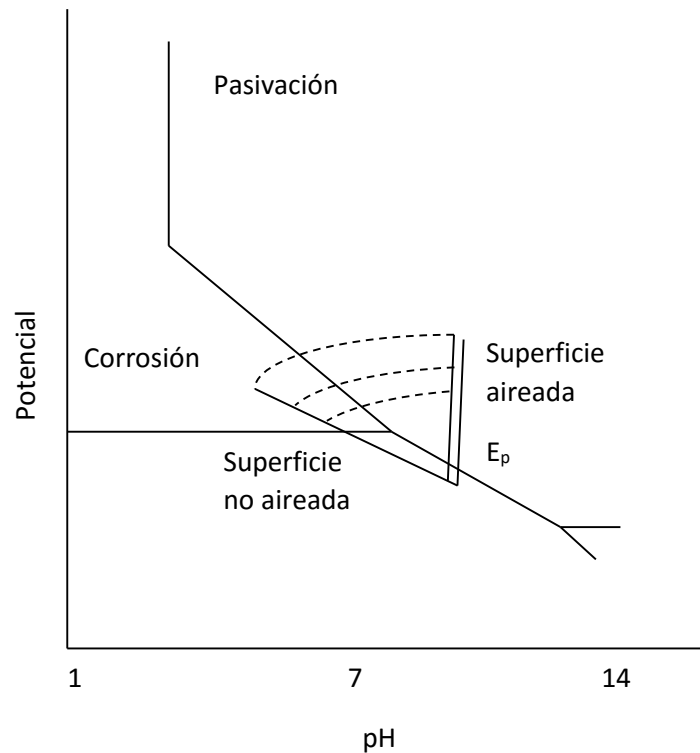


Figura 4.22. Correspondencia entre los valores de pH y potencial en la superficie y en el interior de una picadura en un acero al carbono.

Como toda reacción de reducción, cuanto menor sea el potencial, mayor será la intensidad. En cambio, para la reacción de oxidación es al revés, por lo que, a partir de un cierto valor de potencial, la reacción de disolución del catión y posterior hidrólisis es prioritaria, se produce acidificación local y la picadura avanza. Por debajo de este valor de potencial, la reacción de consumo de protones es prioritaria, no se produce acidificación, se regenera la película pasiva y la picadura deja de ser activa. Este potencial de tránsito es el potencial de picadura o de protección (E_{pr}).

Es decir, en la zona aireada, con capa pasiva estable, el potencial será mayor y el pH será el del medio correspondiente. En la zona interna de la picadura, debido a la acidificación, el pH tenderá a aumentar y, al no haber capa pasiva, el potencial disminuirá. Así, la parte interna se corroerá al actuar como anión. (Ver fig. 4.22).

Además, se observa que por debajo de cierto potencial, se dan condiciones cercanas a la neutralidad.

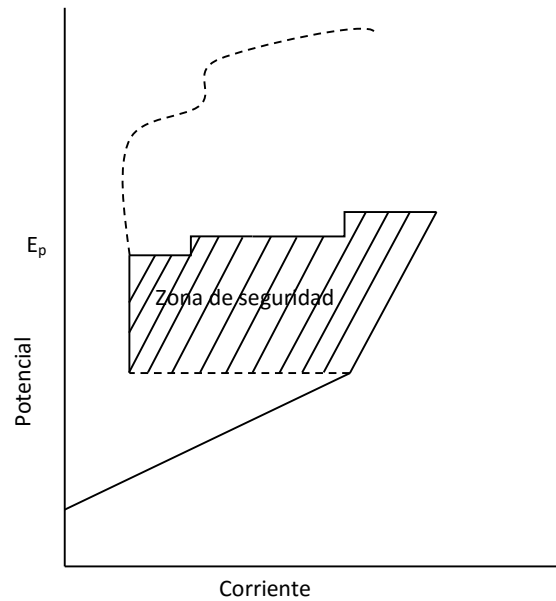


Figura 4.23. Zonas de seguridad limitada por los potenciales de pasivación y picadura en materiales metálicos pasivables en contacto con anión agresivo.

Por ello, igual que cuando el material metálico sin presencia de anión agresivo tenía que situarse entre los potenciales de pasivación y transpasivación; ahora, con presencia de anión agresivo, habrá una zona de seguridad entre los potenciales de pasivación y de picadura (ver fig. 4.23).

También es interesante tener en cuenta que, en caso de cumplirse que el potencial sea superior al de picadura, el número de picaduras por unidad de superficie aumentará al disminuir el potencial al que opera el material, ya que el espesor de la capa será menor y por lo tanto el anión tendrá más facilidad para atravesarla, aumentando el riesgo de rotura.

En caso de medios fuertemente ácidos, la capa pasiva no es estable (potencial de corrosión muy bajo), por lo que el ataque será generalizado y no local (Ver fig. 4.24).

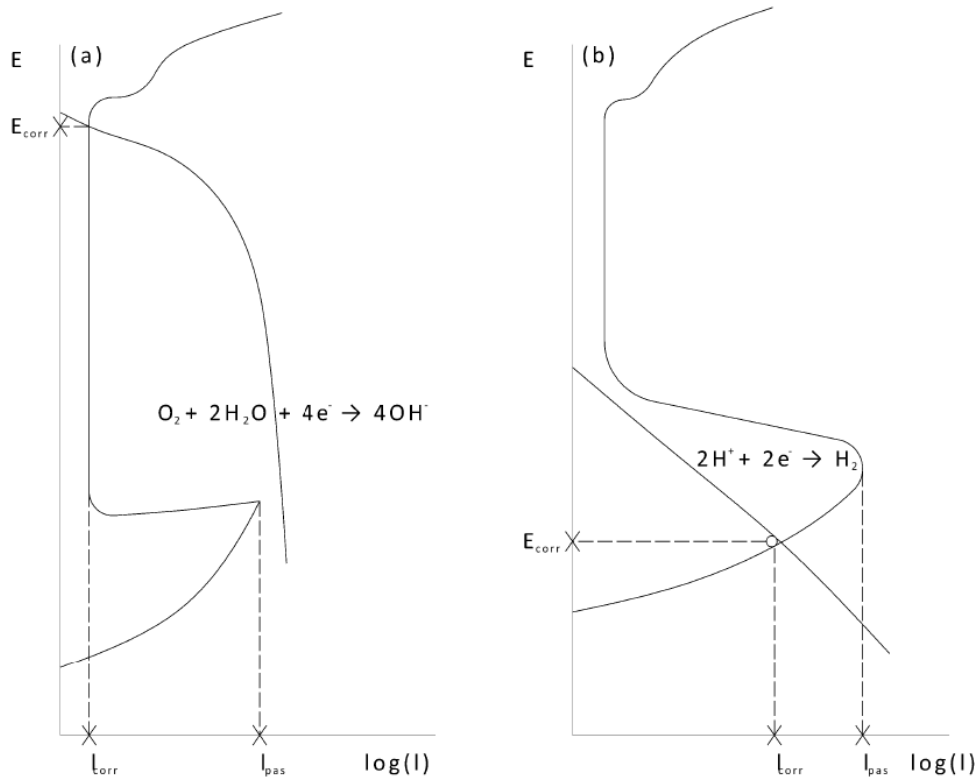


Figura 4.24. Diagrama de Evans para un material metálico pasivable, trabajando en medio neutro o alcalino (a) y en medio ácido (b).

Teniendo en cuenta que la presencia de anión agresivo produce un aumento de la corriente residual de pasivación, la presencia de éste (aun trabajando por encima del potencial de picadura) producirá efectos más severos tanto locales como globales. Por ello se establece el Factor de picadura:

$$\text{Factor de picadura} = \frac{\text{Profundidad promedio picaduras}}{\text{Pérdida de espesor por corrosión generalizada}}$$

$$\text{Factor de picadura} = \frac{P}{d}$$

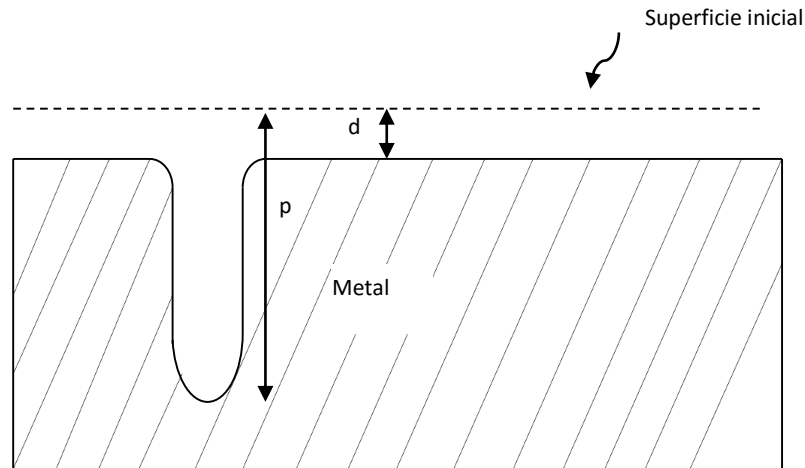


Figura 4.25. Factor de picadura. Fuente: Jones, D.A.: *Principles and Prevention of Corrosion*.

4.5.6 Evaluación de la susceptibilidad a la corrosión por picadura

Métodos químicos

La norma más utilizada para la corrosión de un material metálico es la ASTM G-48.

Se trata de medir la pérdida de material de una probeta realizando pesados antes y después de la exposición a una solución agresiva.

Métodos electroquímicos

Se realiza mediante la medición, en medios donde sea previsible este tipo de corrosión, de los siguientes potenciales críticos:

- **Potencial de ruptura, E_r :** (O de nucleación de picaduras, E_{np}) Límite de potencial por encima del cual nuclean las picaduras, es decir, comienza la formación de picaduras.
- **Potencial de protección (E_{pr}):** (O potencial de picadura, E_p^*) Potencial por debajo del cual el PH en la cavidad sube lo suficiente para que se produzca repasivación o inmunidad termodinámica. La picadura no progresaría.

Si el material se sitúa **entre estos potenciales no se formarán** nuevas picaduras, **pero progresarán** las ya existentes.

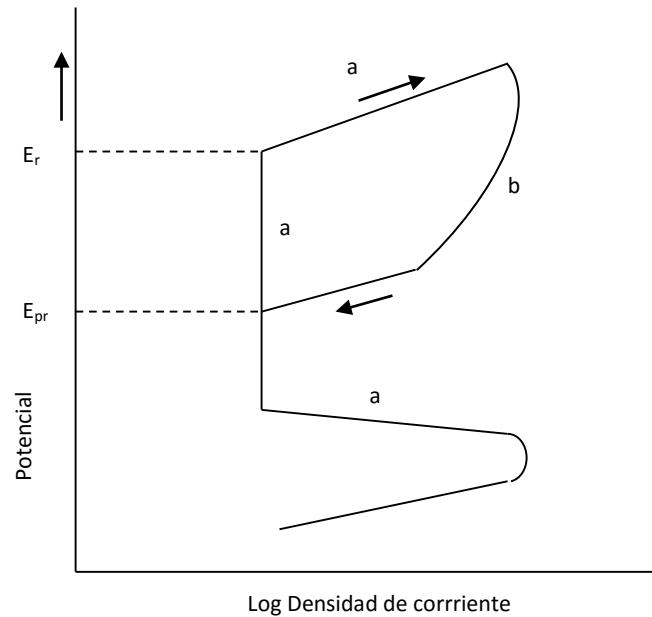


Figura 4.26. Curva potencioestática cíclica para la determinación de E_r y E_{pr} . Fuente: Jones, D.A.: *Principles and Prevention of Corrosion*.

En el ensayo se van barriendo diferentes potenciales entorno a E_r y E_{pr} completando el ciclo (Ver fig. 4.26).

Partiendo de potenciales bajos, se va elevando el potencial hasta E_r (aumento de i en zona de pasivación, parte a de la curva). Luego se disminuye el potencial hasta el punto de corte con a, que será E_{pr} , en donde la corriente vuelve a coincidir con la de pasivación. Este potencial puede ser superior o inferior al de corrosión.

Cuanto mayor sea la diferencia entre E_r y E_{pr} (histéresis anódica), más resistente será el material a la corrosión por picadura.

Si $E_{pr} > E_{corr}$: podrá regenerar la capa pasiva. Si es inferior, no será capaz de regenerar dicha capa.

A la hora de seleccionar el material, se busca:

- E_{pr} y E_r grandes con respecto a E_{corr} .
- Histéresis anódica pequeña.

4.6 Acción conjunta de factores electroquímicos y mecánicos

4.6.1 Corrosión – Fricción (Fretting-corrosion)

Es el deterioro producido en la parte interior entre dos superficies en contacto, una de ellas, al menos, metálica, en contacto con aire con un cierto grado de humedad, cuando tiene lugar un desplazamiento relativo, aunque sea mínimo, de una respecto a la otra. Este desplazamiento suele ser de muy pequeña magnitud y originado, generalmente, por vibraciones.

También se utilizan para definirlo los términos corrosión por frotamiento o por desgaste.

El fenómeno tiene que ver con el efecto abrasivo derivado de la presencia de partículas de óxido en la parte interior, provenientes de las capas de productos oxidados localizados sobre la superficie metálica, y originados como consecuencia de procesos de corrosión electroquímica.

4.6.1.1 Mecanismo de la corrosión – fricción

Cuando dos superficies aparecen en contacto, aunque aparentemente éste se produce en la totalidad de la parte interior, en realidad sólo se produce en determinados puntos o regiones (un cierto % de la superficie).

Cuando tiene lugar un desplazamiento relativo, se produce levantamiento de partículas de productos sólidos provenientes de capas de productos oxidados. Estas zonas quedan limpias de capa protectora, lo que favorece el mecanismo electroquímico de corrosión por despolarización de las reacciones anódica y catódica, generando nuevamente productos de corrosión que vuelven a ser desprendidos por fricción. Estos productos actuarán como abrasivos, facilitando la incorporación de más partículas.

Factores influyentes:

- Agresividad del medio
- Carácter abrasivo de las partículas desprendidas
- Frecuencia de vibración
- Número de ciclos
- Longitud del desplazamiento
- Carga aplicada

Cualquiera de estos factores podrá ser el predominante según el caso.

A menudo, el ataque inicial por corrosión-fricción, origina picaduras, a partir de las cuales y como consecuencia de la existencia de tensiones cíclicas originadas por la vibración, se puede propiciar la nucleación y facilitar el crecimiento de grietas, a través de un mecanismo de corrosión-fatiga.

Casos típicos en los que aparece

- Muelles de suspensión de automóviles o ferrocarriles
- Regiones de contacto entre elementos metálicos, constitutivos de piezas pertenecientes a maquinaria que se transporta por carretera o ferrocarril.
- Conectores relés y contactores eléctricos
- Tubos de intercambiadores de calor, en las zonas de contacto con los soportes, debido a vibraciones originadas por la circulación del fluido. Este problema es típico en la industria nuclear.
- Zonas de máxima concavidad de los álabes en forma de “cola de milano” de las turbinas de gas. En este caso, el fenómeno puede ser catastrófico.

4.6.1.2 Recomendaciones para la prevención de fenómenos de corrosión-fricción

- Tratar de evitar en todo lo posible el desplazamiento de una superficie sobre la otra: Aumentando la carga o la rugosidad, chorreado.
- En caso de no poder reducir el desplazamiento, reducir la carga.
- Tratar de que el contacto sea entre metal duro y blando, para que no quede aire en la parte interior. Puede producir deformación por cizalladura. No es recomendable poner en contacto superficies de Inox, por su carácter de metal duro y por la presencia de capas pasivas.
- Emplear lubricantes. Es el más utilizado. Se tratan con un tratamiento de conversión, generalmente un fosfatado. Sobre el fosfatado se aplica un aceite de baja viscosidad. Es eficaz para cargas no muy elevadas.
- Situar en la intercara un polímero (ej: teflón) que evita el contacto y el desplazamiento; o inyectar un metal de bajo punto de fusión. Sólo para cargas reducidas.

4.6.2 Corrosión-erosión

Se denomina así al deterioro causado por fluidos con o sin sólidos en suspensión, que se desplazan por encima de un cierto valor umbral de velocidad

sobre una superficie metálica. El ataque aumenta con la velocidad del fluido debido al levantamiento de capas protectoras por erosión e incluso de material metálico.

a) Reacción catódica de reducción de O_2 sin sólidos suspendidos:

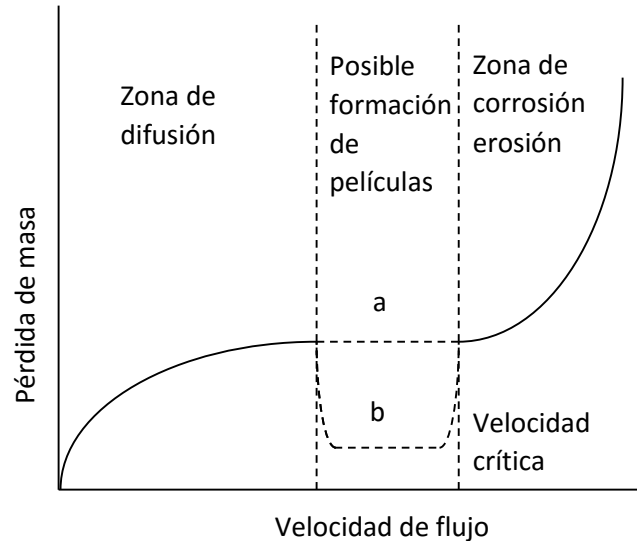


Figura 4.27. Relación entre pérdida de masa y velocidad de flujo cuando el fluido no transporta sólidos en suspensión.

Es la situación más habitual. La relación pérdida de masa con respecto a la velocidad del fluido es el de la fig. 4.27.

En una primera etapa (difusión), aumenta la corrosión con la velocidad de flujo con una función parabólica, por despolarización catódica, al mejorar la llegada de oxígeno hasta las regiones catódicas por generarse corrientes de convección forzada y disminuir el espesor de la capa límite de difusión.

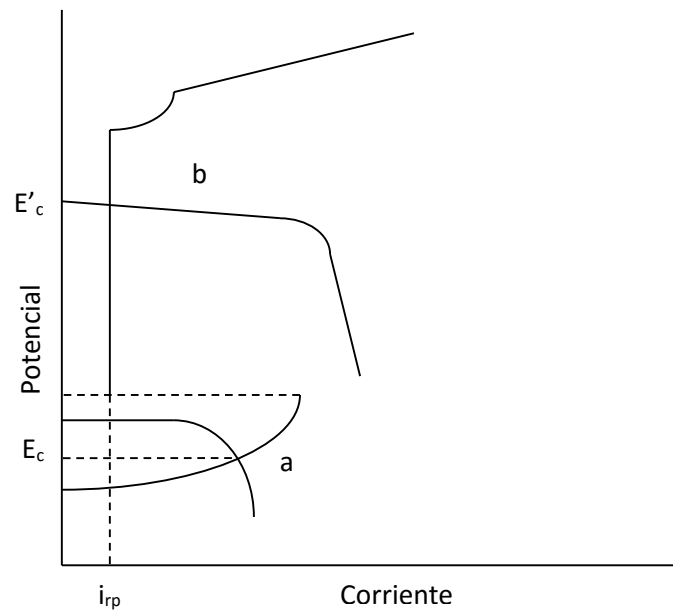


Figura 4.28. Diagrama de Evans que muestra la posibilidad o no de pasivación en función de la velocidad de flujo.

A partir de cierto valor de flujo, el sistema pasa a estar bajo control mixto, por lo que aumentos de velocidad de flujo no modifican apreciablemente la pérdida de material (trazado a). En esta zona es posible la formación de películas protectoras.

Para materiales pasivables, puede que a bajas velocidades (poco O_2 accede al cátodo) el potencial de corrosión se sitúe por debajo del potencial de pasivación (Fig. 4.28, curva a). En cambio, para velocidades mayores, el potencial puede superar al de pasivación, formando capa pasiva estable (Fig. 4.27 y 4.28, curvas b). Esto reduciría considerablemente la cantidad de material perdido.

A partir de un cierto valor crítico de velocidad, comienza la corrosión-erosión, debido a la eliminación total o parcial de las películas protectoras. Se produce un aumento de masa perdida con un perfil exponencial. Este límite no debe superarse.

Esto último puede suceder por:

- Uso de diámetros demasiado pequeños
- Cambios bruscos de orientación y reducciones

Que originarían aumentos locales de velocidad. (Fig. 4.29)

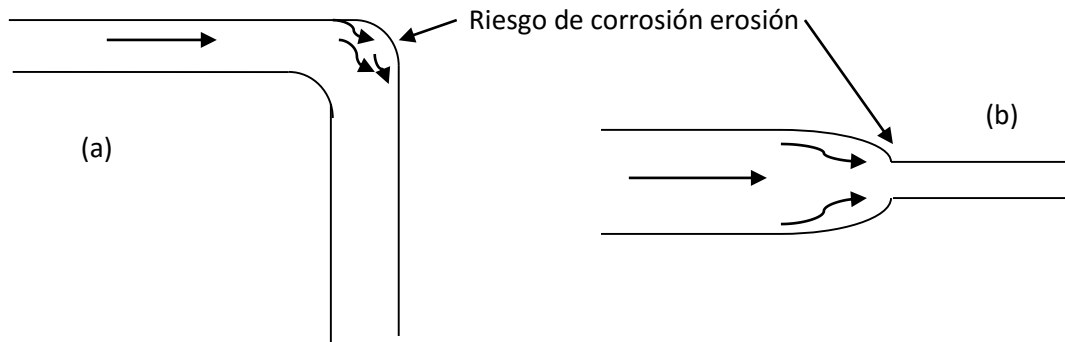


Figura 4.29. Riesgo de aparición de fenómenos de corrosión-erosión en cambios bruscos de orientación (a) y en cambios bruscos de sección.

b) Reacción catódica de reducción de O_2 con sólidos suspendidos:

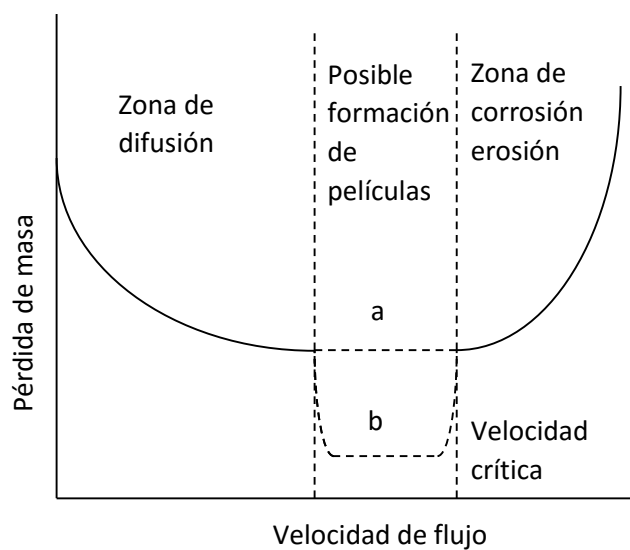


Figura 4.30. Relación entre pérdida de masa y velocidad de flujo en tramos horizontales, cuando el fluido transporta sólidos en suspensión.

La curva entonces toma la forma de la Fig. 4.30.

El cambio más significativo es en la zona de difusión, ya que la pérdida de masa aumenta al disminuir la velocidad.

Esto se debe a la aparición de fenómenos de aireación diferencial, como consecuencia de la sedimentación de sólidos sobre la generatriz de apoyo en los tramos horizontales de la conducción (Macro pilas de aireación diferencial). Este efecto es superior al de despolarización catódica.

Si el material fuera pasivable, en las zonas de sedimentación, el potencial de corrosión podría situarse por debajo del de pasivación, impidiendo la formación de capa pasiva. Así, la pila de aireación diferencial degeneraría en una pila activa-pasiva, con mayores diferencias de potencial entre electrodos, y por lo tanto ataques más severos en estas zonas.

El valor límite inferior de la velocidad dependerá de la granulometría y densidad del sólido, pero es aproximadamente 1 m/s, por lo que se deberá evitar esta situación con metales pasivables.

Además, la pendiente de la zona de corrosión-erosión será mayor por la acción erosiva del sólido, y la velocidad a la que comenzará este efecto también será menor.

La resistencia a la corrosión-erosión de los materiales metálicos depende fundamentalmente de su capacidad para formar capas pasivas adherentes y de las propiedades mecánicas del propio material (dureza, resistencia a la tracción, etc.)

4.6.3 Corrosión-cavitación

Se produce cuando un elemento metálico aparece en contacto con líquidos y está sometido a vibración, o bien, el líquido circula a muy alta velocidad, por lo que debe considerarse un caso extremo de corrosión-erosión.

4.6.3.1 Mecanismo de la corrosión-cavitación

Se produce cuando, por vibraciones del elemento mecánico o por la elevada velocidad del líquido en régimen turbulento, una pequeña porción de líquido pasa a estado de vapor debido a la existencia en esa zona de una presión inferior a su tensión de vapor.

Un instante después, la burbuja pasa a una zona de presión mayor a su tensión de vapor e implosiona. Esto origina unas presiones del orden de miles de atmósferas, y el fluido puede llegar a alcanzar unas velocidades del orden de 500 m/s.

Si esto sucede cerca de la superficie metálica, erosionan severamente las películas protectoras e incluso arrancan material, originando rugosidades que serán zonas preferentes de nucleación de nuevas burbujas cavitantes.

Estas zonas de metal limpio favorecen la corrosión electroquímica, formando nuevas películas (consumiendo material) que vuelven a ser arrancadas.

Es típico en hélices de barcos, turbinas, camisas de refrigeración, ...

Morfológicamente se caracteriza por la aparición de socavaduras en forma de herradura, orientadas en la dirección del flujo (Fig. 4.31 y 4.32).

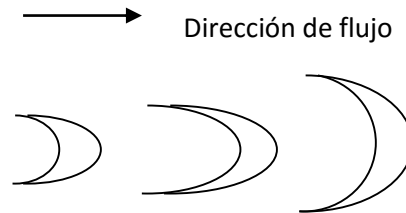


Figura 4.31. Representación esquemática de las formas de herradura características orientadas en la dirección del flujo de procesos de corrosión-cavitación.



Figura 4.32. Ataque por corrosión-cavitación observado en una bomba de acero inoxidable austenítico. Fuente: *Metals Handbook*, vol. 13.

En la fig. 4.32 se ve corrosión en bomba de acero inoxidable austenítico.

Para evitarlo se recomienda:

- Seleccionar aleaciones duras
- De estructura cristalina homogénea
- Preferiblemente monofásicas y de grano fino.

Aleaciones adecuadas:

- Aceros inoxidables austeníticos y ferríticos
- Aleaciones de cobre de levada dureza (ej: bronce de aluminio)
- Superaleaciones de base cobalto

Otras acciones preventivas:

- Diseño que reduzca velocidades
- Protección catódica: Controla mecanismo electroquímico de corrosión y Metal por debajo del potencial de reducción de agua con formación de H₂ (las burbujas de este gas producen amortiguamiento de las de cavitación)

4.7 Corrosión en contacto con los medios naturales

4.7.1 Introducción

La corrosión en contacto con medios naturales supone un alto porcentaje del total del material metálico expuesto a medios agresivos.

La peculiaridad común de estos casos es que, salvo excepciones raras, se trata de ambientes aireados, de PH neutro o ligeramente alcalino, y en ausencia de oxidantes fuertes. Por lo tanto, la reacción catódica será la reducción de oxígeno. A continuación, se aclararán determinados conceptos importantes.

- **Corrosión atmosférica:** *“Es el deterioro que sufren los materiales metálicos cuando se encuentran en contacto con el aire a temperatura ambiente”*. Se estima que supone un 50% de las pérdidas económicas totales por corrosión.

Los principales aspectos a tener en cuenta son:

- **Grado de humedad:** Sólo si HR es inferior a 30-40% y sin presencia de lluvia, se evitaría la formación sobre el metal de una película de agua y en ese caso el mecanismo de corrosión sería la corrosión directa, similar a la corrosión seca o a alta temperatura. En este caso, para temperaturas convencionales, la velocidad de corrosión será prácticamente despreciable. Si no se da alguna de las condiciones anteriores, se producirá sobre el metal una capa de humedad (puede ser imperceptible a simple vista), mediante condensación, permitiendo el mecanismo electroquímico de la corrosión, y ésta puede ser importante. El valor de HR a partir del cual la corrosión es relevante, se denomina “Humedad

crítica”, y será determinante el tiempo que esta humedad esté actuando “Tiempo de humectación”.

- **Agentes contaminantes:** Además, dicha película de humedad puede contener ciertos contaminantes agresivos que aceleran el proceso de corrosión: SO₂ o Cl⁻, y en menor medida, compuestos oxidados de nitrógeno. Para HR superior a 30-40% o presencia de lluvia.

4.7.2 Formación de la película de humedad sobre la superficie expuesta

Mecanismos más comunes:

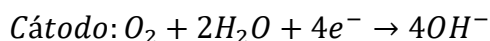
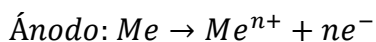
- Por la lluvia
- Temperatura del metal inferior a la de rocío – Condensación

Otros mecanismos:

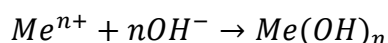
- a) **Condensación por capilaridad:** El valor de HR local en zonas cóncavas varía inversamente con el radio, lo que puede originar humedades superiores del 80% en zonas de productos oxidados, con partículas de polvo, grietas y resquicios, facilitando la condensación local.
- b) **Condensación por adsorción:** Formación de moléculas de agua, de carácter polar, en la superficie por fuerzas físicas de atracción.
- c) **Condensación química:** Debido a la fijación de agua por productos higroscópicos (óxidos, hidróxidos o hidróxidos básicos) formados por la corrosión.

4.7.2.1 Mecanismo de la corrosión atmosférica

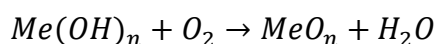
Reacción electrolítica básica:



Reacciones secundarias:



En presencia de más oxígeno:



Por lo que los productos serán: hidróxidos, óxidos hidratados y oxihidróxidos del metal.

Estas reacciones se pueden despolarizar debido a la presencia de ciertos contaminantes.

4.7.3 Influencia de distintos factores sobre la velocidad de corrosión de los materiales metálicos en contacto con la atmósfera

a) Espesor de la película húmeda:

Para películas de pequeño espesor ($<10 \mu\text{m}$, películas invisibles), la reacción estará bajo control anódico de resistencia debido a:

- Difícil disolución y posterior hidratación del catión.
- La precipitación de productos oxidados insolubles introduce una caída óhmica adicional en el circuito electroquímico.

Además, la llegada de abundante oxígeno a la superficie y la escasez de moléculas de agua para disolver e hidratar al catión favorece la aparición de películas pasivas.

En estas condiciones, la velocidad de corrosión es prácticamente despreciable.

Según crece el espesor, la velocidad de corrosión (Ver fig. 4.33) aumenta hasta alcanzar un máximo para espesores del orden de $100 \mu\text{m}$.

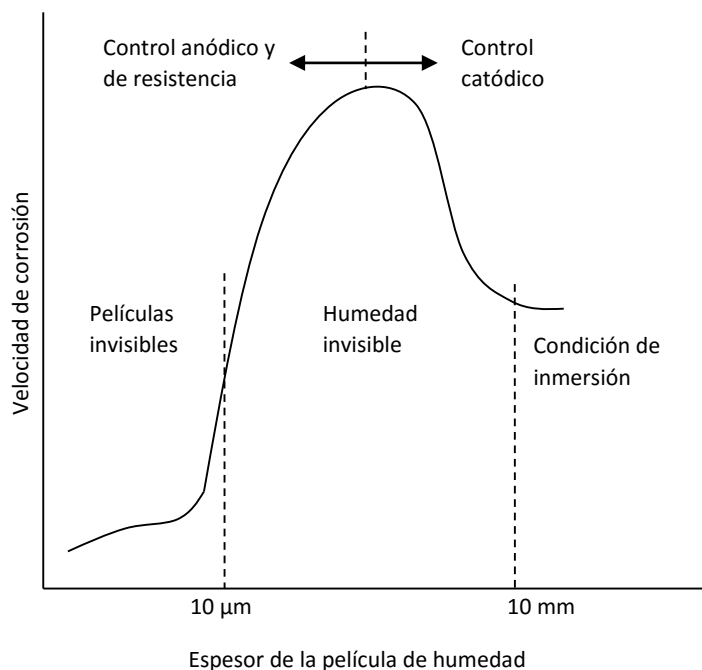


Figura 4.33. Efecto del espesor de la película de humedad sobre la velocidad de corrosión.

A partir de ese máximo, la velocidad vuelve a disminuir debido al control catódico por la dificultad del oxígeno a acceder hasta la superficie metálica.

Espesores superiores a 1 mm se consideran como inmersión, y a partir de este espesor la velocidad de corrosión se estabiliza.

b) Contaminación atmosférica:

Los contaminantes atmosféricos con mayor influencia son: SO_2 , Cl, óxidos de nitrógeno y el CO_2 .

El SO_2 :

El SO_2 se encuentra principalmente como consecuencia de combustión de combustibles fósiles, por lo que su concentración será mayor cerca de zonas urbanas e industriales.

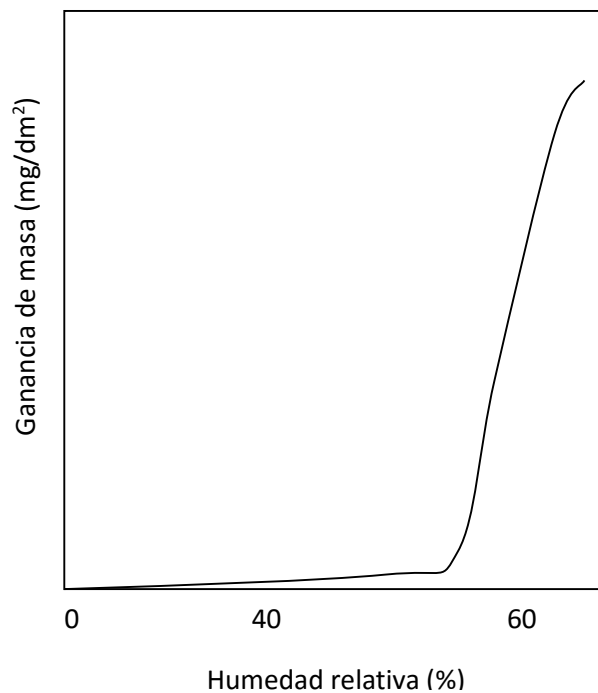


Figura 4.34. Influencia de la humedad relativa de la atmósfera en la velocidad de corrosión del acero en presencia del 0,01% en peso de SO_2 . Fuente: Jones, D.A.:

Principles and Prevention of Corrosion.

El efecto que tiene sobre la corrosión es el de aumentar su velocidad cuando la HR se sitúa por encima de ciertos valores (60% para acero al carbono, 80% para el aluminio, 40-50% para Cu o Zn, etc.) (Ver Fig. 4.34)

La necesidad de esa humedad mínima se debe al mecanismo de corrosión. El agente realmente agresivo es el H_2SO_4 formado por reacción del óxido de azufre disuelto en el electrolito y las moléculas de agua.

En el caso del acero, el óxido de azufre actúa como catalizador, produciendo goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$) y hematites ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$). En el caso de los otros metales, el óxido no actúa como catalizador.

Por ello, no debe usarse acero en atmósferas contaminadas con esta sustancia sin una protección adecuada (como pinturas anticorrosivas), en cambio para los otros materiales no es necesaria esa protección.

Otros efectos del SO_2 son:

- La disolución de las capas protectoras en los ánodos por acción del H_2SO_4 formado.
- El H_2SO_4 reduce la posibilidad de fenómenos de polarización de resistencia porque hace que el electrolito sea más conductor.
- Puede cambiar la reacción catódica de reducción de O_2 a reducción de H^+ , produciendo su despolarización.
- Puede actuar también como captador de electrones en concentraciones altas, y como oxidante también despolariza el cátodo al aumentar su concentración local en el cátodo debido a su alta solubilidad en agua, mucho mayor que la del O_2 .

El anión Cl^- :

Es el segundo en importancia. Su presencia dependerá mucho de:

- Distancia al mar
- Dirección e intensidad de viento

Influencia en el proceso anódico:

- Aumenta la densidad de corriente residual de pasivación.
- Propicia ataque local de picadura rompiendo la película pasiva.
- En presencia de agua puede formar HCl , descendiendo el PH. Este descenso de PH favorece la disolución de las capas protectoras: despolarización anódica y mayor conductividad del electrolito.

En cuanto al proceso catódico, su influencia es prácticamente nula.

Óxidos de nitrógeno (NO₂):

Tienen una influencia menos marcada que los anteriores. Su influencia es más relevante a HR del orden del 50%, sobretodo en presencia de SO₂, aumentado la velocidad de corrosión del acero.

Las reacciones que suceden en el proceso no son bien conocidas, pero básicamente el NO₂ pasa a la herrumbre en forma de nitritos formado microclimas ácidos.

A HR superiores, la película húmeda actúa de barrera contra los óxidos de nitrógeno.

CO₂:

Este contaminante suele aparecer en concentraciones de 0,03-0,05% en volumen. Su papel tiene que ver fundamentalmente con la acidificación del electrólito, lo que podría modificar, al menos en parte, la reacción catódica.

c) Efecto de la lluvia ácida:

Se trata del efecto de la lluvia que arrastra contaminantes (HCl, HNO₃, H₂SO₄ y ácidos orgánicos) presentes en la atmósfera cuando éste se encuentra en altas concentraciones.

Una vez puestos en contacto con la estructura, se produce un aumento de acidez del electrólito (PH<4) con los siguientes efectos:

- Despolarización anódica y de resistencia
- Despolarización catódica: reducción de protones.

4.7.4 Predicción de datos de corrosión atmosférica

A la hora de evaluar el ambiente se deben de tener en cuenta los siguientes factores: HR, lluvia y presencia de contaminantes en magnitudes tal que tengan influencia en el proceso.

Para establecer la presencia de contaminantes, se hace la siguiente clasificación:

- Rurales (Ausencia de contaminantes)

- Urbanas / industriales (fundamentalmente SO₂ y NO_x)
- Marinas (Cl⁻)

La predicción de la corrosión al cabo de t años se realiza a partir del valor del primer año (A) conocido experimentalmente:

$$C = At^n$$

n: Variable en función del metal, atmósfera y condiciones de exposición (indica aceleración / desaceleración con el tiempo).

El valor n se puede estimar mediante diversas ecuaciones de la bibliografía.

Para estimar el valor de la corrosión en el primer año también existen diversas ecuaciones.

4.7.5 Métodos de protección contra la corrosión atmosférica

- **Recubrimientos protectores metálicos:** de metales más resistentes o activos que el original para suministrarle protección catódica.
- **Pinturas anticorrosivas:** basadas en distintos vehículos de naturaleza orgánica o inorgánica, con inhibidores de corrosión en su composición, sustituyendo a los habituales pigmentos.
- **Disminución de la HR:** siempre y cuando se trate de espacios cerrados, por debajo del 40% mediante refrigeración, empleo de sustancias higroscópicas o aumentando la temperatura.
- **Empleo de inhibidores en fase vapor:** solución aplicable únicamente en espacios de volumen de aire limitado.

4.7.6 Corrosión en contacto con agua dulce

En contacto con agua, en general, el mecanismo de corrosión es la electrolización del oxígeno disuelto en la misma. Por lo tanto, es necesaria la presencia del oxígeno y la velocidad de la corrosión será proporcional a la concentración del mismo.

Para altas concentraciones, puede darse la pasivación del metal, reduciéndose la velocidad de corrosión.

Además, la presencia de otros gases disueltos y el contenido en sales del agua (que varía considerablemente la conductividad del agua) influirá en su

agresividad. También se considerará la temperatura y la velocidad de desplazamiento del agua sobre la superficie.

4.7.6.1 Factores que influyen en el nivel de agresividad del agua dulce

Oxígeno:

Dado que es imprescindible en el proceso de corrosión, y que su solubilidad en agua es baja, habitualmente el mecanismo estará bajo control catódico por efectos de polarización de difusión, debido a la dificultad del O_2 a llegar hasta el metal.

- **Velocidad del fluido:** Al aumentar, aumenta la corrosión. Por encima de cierto valor aparece el fenómeno de corrosión-erosión.
- **Concentración de O_2 :** Para valores altos, por encima de 12-15 ml O_2 /litro, se produce pasivación del acero.
- **Pilas de aireación diferencial:** Son habituales, formando picaduras.
- **Circuitos cerrados:** La corrosión puede ser prácticamente nula al consumirse en el inicio el oxígeno.
- **CO_2 :** Sólo en casos de muy altas condiciones puede producir acidificación, por lo que en el resto de casos su influencia es mínima para los aceros.

En el caso del cinc, puede transformar los productos protectores reduciendo su efectividad y aumentando la corrosión.

En el cobre también modifica la capa protectora, aumentando la corrosión. Además, facilita el ataque por picadura.

- **Agua dura-blanda:** Las aguas duras son menos corrosivas ya que tienden a precipitar carbonatos insolubles de Ca y Mg. Esto polariza la reacción catódica, reduciéndose la velocidad de corrosión.
- **Índice de saturación "IS":** Permite clasificar la agresividad del agua en la corrosión. Para ello compara el PH real con el debido a diferentes sustancias disueltas en el agua. Un valor positivo indica tendencia a la formación de capas protectoras. Se considera adecuado un valor por encima de 0,5.
- **Temperatura:** Su aumento, facilita el transporte por difusión del O_2 , aumentando la velocidad de corrosión. A partir de unos 80°C, para

sistemas abiertos, el vapor arrastra el O_2 , disminuyendo la velocidad de corrosión, en sistemas cerrados el oxígeno no puede escapar, por lo que la corrosión seguirá aumentando mientras haya suficiente oxígeno.

En el cinc, a partir de $60^\circ C$, se produce la inversión de la polaridad respecto del hierro, por lo que para aceros galvanizados podría aparecer corrosión por picadura.

- **PH:** Para valores de entre 4 y 10 (los habituales), el PH no influye a penas en la velocidad de corrosión.

A $PH < 4$, se destruyen las capas protectoras del hierro y la reacción catódica pasa a ser la reducción de protones, aumentando mucho la velocidad.

En medios muy alcalinos, se produce la pasivación del acero. Sólo en medios sin O_2 y a alta temperatura se produciría agrietamiento por fragilización por hidrógeno (caldera, recalentadores, ...)

El cinc, en medios muy ácidos o muy alcalinos, la velocidad de corrosión aumenta exponencialmente, por lo que su uso se restringe a $6 < PH < 12$.

- **Resistividad del agua:** Influye en la extensión de la pila bimetálica, aumentando según disminuye la resistividad.

4.7.6.2 Recomendaciones para reducir el riesgo de corrosión de materiales metálicos en contacto con agua dulce.

- a) Evitar la introducción de O_2 en los circuitos.
- b) Evitar la formación de pares galvánicos o introducir un aislamiento eficaz entre los metales disimilares.
- c) En acero galvanizado, la temperatura no deberá superar los $60^\circ C$.
- d) Cuando sea posible usar inhibidores que disminuyan el contenido de oxígeno (sulfitos, hidracina, etc.).

4.7.7 Corrosión marina

El término se aplica a los materiales metálicos en contacto directo con agua de mar, como barcos, plataformas, etc.-

Se trata de un electrolito especialmente agresivo debido a:

- Alta conductividad
- Máxima solubilidad de O_2 según la concentración de NaCl habitual

- El anión Cl^- puede romper localmente películas pasivas generando fenómenos de corrosión por picadura
- Las densidades de corriente residuales de pasivación en aleaciones pasivables aumentan en presencia de anión Cl^- , lo que se traduce en aumentos en la velocidad de corrosión generalizada
- En su seno se desarrollan con facilidad fenómenos de corrosión microbiológica

| Cationes | % | Aniones | % |
|-----------|-------|---------------------------|------|
| Sodio | 30,40 | Cloruro | 55,2 |
| Magnesio | 3,70 | Sulfato | 7,70 |
| Calcio | 1,16 | Bromuro | 0,10 |
| Potasio | 1,10 | Ac. bórico | 0,07 |
| Estroncio | 0,04 | Bicarbonatos y carbonatos | 0,35 |

Tabla 4.2. Principales iones que participan en la composición del agua de mar y su concentración en % en peso

Se estima que esta corrosión puede suponer el 20% del total de pérdidas por corrosión en países con abundante actividad costera y marítima.

El agua de mar tiene una composición compleja, con abundantes elementos químicos y sustancias orgánicas. (Ver cuadro 4.2).

También aparecen gases disueltos que provienen de la atmósfera: N_2 , CO_2 y O_2 .

O_2 : Es el reactivo catódico. Dada la alta solubilidad y al elevado nivel de agitación del medio, la polarización de la reacción catódica es reducido en comparación con el agua dulce. El nivel de aireación se extiende hasta profundidades considerables.

Conductividad: Es elevada en comparación con el agua dulce, $0,03\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ frente a $5 \cdot 10^{-8}$.

pH: Se sitúa en torno al 8,2, aunque en zonas de alta contaminación por materia orgánica en descomposición puede alcanzar la zona ácida y podría cambiar la reacción catódica.

En zonas superficiales, el desprendimiento de CO₂ por fotosíntesis puede llevar al agua de mar a valores de pH cercanos a 9.

En el agua de mar se pueden dar prácticamente todos los tipos de corrosión:

- Generalizada: Con bajos niveles de control anódico, catódico y de resistencia.
- Aireación diferencial: Sobre todo si hay incrustaciones.
- Galvánica: Favorecida por la alta conductividad, lo que permite la formación de macropilas con grandes distancias entre electrodos.
- Picadura: Debido a la presencia de cloruros, fundamentalmente en aleaciones pasivables.
- Corrosión-erosión: Cuando el agua se mueve por encima de ciertas velocidades críticas, según material.
- Corrosión bajo tensión: Ya que los medios con cloruros constituyen un medio agresivo específico para muchas aleaciones.
- Corrosión-fatiga: Fundamentalmente en las hélices de bronce de las embarcaciones.
- Corrosión microbiológica: Debido a que se dan condiciones muy favorables para la vida de los microorganismos.

4.7.7.1 Influencia de la profundidad a la que se sitúa el material metálico

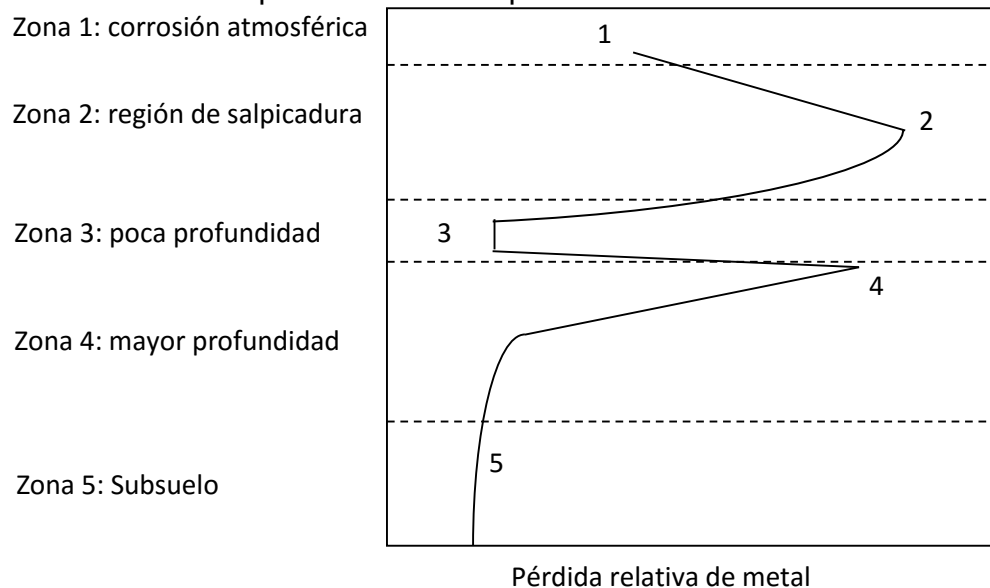


Figura 4.35. Perfil relativo de corrosión del acero sumergido en agua de mar. Fuente: Jones, D.A. *Principles and Prevention of Corrosion*.

La fig. 4.35 da el perfil relativo de corrosión, para el caso del acero, en función de la profundidad en el medio marino:

- El punto 1 es la corrosión con atmósferas marinas.
- El punto 2 es la región de salpicadura, la más agresiva. Es la zona justo por encima de la línea de agua. La película de agua sobre la superficie metálica presenta el espesor crítico ($100\mu\text{m}$), con mínimos controles anódico, catódico y de resistencia.
- A partir del punto 2, la corrosión disminuye por reducción de O_2 , hasta alcanzar el mínimo entre 200 y 1000 m.
- A mayores profundidades (hasta punto 4) ya no hay oxidación de MO, por lo que la concentración de O_2 vuelve a aumentar alcanzando un nuevo máximo.
- A partir de 4, el fenómeno de polarización catódica aumenta y la corrosión disminuye hasta los 1500 m.
- A partir de entonces es cte. Aquí, el O_2 es prácticamente nulo, desarrollándose bacterias anaerobias.

El valor medio de velocidad de corrosión de acero sumergido en agua de mar es de 0,12 – 0,15 mm/año.

4.7.7.2 Incrustaciones

Incrustación es la fijación de organismos de origen animal o vegetal sobre la superficie de materiales metálicos en contacto con agua de mar. Cuando un metal se sumerge durante un corto período de tiempo, se cubre con un “**velo biológico**”. Este velo se compone de bacterias, algas unicelulares y protozoos, que facilita la posterior fijación de los organismos que constituyen la incrustación.

Las incrustaciones aceleran la corrosión por aportación al medio de **sustancias agresivas** y propiciando fenómenos de **aireación diferencial**.

4.7.8 Corrosión de materiales metálicos enterrados

El terreno supone un medio muy heterogéneo en multitud de factores. Éstos inciden en el grado de corrosión previsible de las estructuras metálicas en contacto.

4.7.8.1 Reacciones de corrosión en contacto con el suelo

Teniendo en cuenta que haya un mínimo de humedad para que exista la película húmeda, las reacciones serán las siguientes:

- Anódica: Disolución del metal.
- Catódica:
 - Habitualmente: Reducción de O₂.
 - Suelos ácidos: Reducción de protones. (Al menos en parte)

4.7.8.2 Características del suelo como medio agresivo

Para suelos porosos, de partículas gruesas (0,07 a 2 mm), aireados y secos, la resistividad es alta y son poco agresivos.

Para suelos de partículas coloidales (<0,07 mm), la resistividad será baja y serán agresivos.

Además, en la zona removida para la instalación de la estructura, la composición del suelo puede variar con respecto al entorno y la compactación será menor.

La menor compactación supone mayor permeabilidad de agentes agresivos (O₂ y H₂O). La humedad en la zona de asiento suele ser mayor por condensación capilar, originando mayor ataque a esta zona.

En terrenos muy húmedos (gran espesor de película húmeda), la reacción anódica está despolarizada, pero se dificulta la catódica, ya que el O₂ debe disolverse en el agua que rellena los microporos y desplazarse por fusión hasta la superficie metálica (no es posible ni convección forzada ni migración).

En terrenos muy secos, casi no existe película. La corrosión puede ser nula o mínima debido al fuerte control anódico y de resistencia.

Por ello, los terrenos más agresivos son los de humedad intermedia. Esta agresividad dependerá básicamente de:

- Humedad
- Contenido en sales

| Resistividad | Características corrosivas del suelo |
|------------------------------|--------------------------------------|
| <900 Ωcm | Muy corrosivo |
| 900-2300 Ωcm | Bastante corrosivo |
| 2300-5000 Ωcm | Moderadamente corrosivo |
| 5000-10000 Ωcm | Ligeramente corrosivo |
| >10000 Ωcm | Muy ligeramente corrosivo |

Tabla 4.3. Clasificación de los suelos en cuanto a su agresividad en función de la resistividad que presentan.

Es habitual clasificar los suelos, en cuanto a agresividad, en función de la resistividad (mecanismos de macropilas o micropilas).

Por ello será importante tener métodos para determinar la resistividad. El más clásico es el de Wenner:

- Disponer 4 electrodos a distancia constante d .
- Los dos exteriores, conectados a una fuente eléctrica con un amperímetro.
- Los dos interiores conectados con un voltímetro entre sí.
- El paso de corriente entre los exteriores genera un campo eléctrico, de forma que los interiores adquieren diferente potencial.
- Mediante la fórmula correspondiente se puede obtener el valor de resistividad.

También se puede determinar mediante equipos comerciales.

pH del terreno: Habitualmente el terreno presenta pH alcalino o neutro, pero debido al CO_2 disuelto, el pH puede volverse ácido. Otra causa puede ser la presencia de MO en descomposición.

Esto puede dar lugar a que, al menos parcialmente, la reacción de reducción sea la de protones, lo que introduciría un factor de despolarización catódica y el consiguiente aumento en la velocidad de corrosión.

En caso de terrenos muy alcalinos (>9), se originaría la corrosión de metales anfóteros, formando aniones solubles.

Contenido en sales: La mayoría de suelos están constituidos por:

- Silicatos y carbonatos de Ca y Mg
- Óxidos de Al y Fe insolubles
- Sales solubles (gran influencia en conductividad): Cloruros, y sulfatos de Na, K, Ca y Mg.

El anión Cl^- contribuye rompiendo localmente películas pasivas y facilitando la corrosión por picadura

El SO_4^{2-} puede participar en la acción biológica de bacterias sulfatorreductoras.

4.7.9 Mecanismos de corrosión por micro y macropilas

Terrenos resistivos: La fuerte caída óhmica a través del medio impide el funcionamiento de macropilas. Así el mecanismo será el de micropilas, originadas en las heterogeneidades del propio metal o en el medio en contacto.

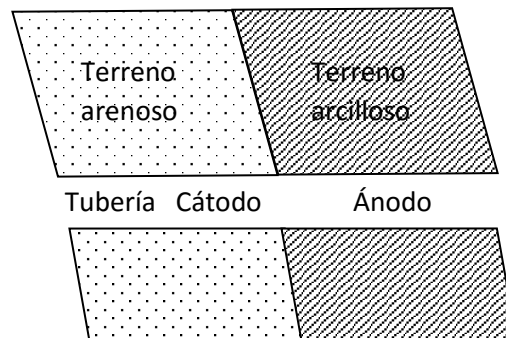


Figura 4.36. Representación esquemática de una tubería enterrada en contacto con suelos de diferente estructura y composición. Si el terreno es conductor puede funcionar el mecanismo de corrosión por macropilas.

El resultado es un ataque más o menos generalizado a lo largo de toda la superficie expuesta, que no suele ser muy severo y que define la “*corrosividad absoluta*” del terreno.

Terrenos conductores: Permite el circuito electroquímico entre ánodos y cátodos separados por grandes distancias. El origen principal es la aireación diferencial, constituyendo lo que se conoce como “*Corrosividad relativa*” del terreno, debido a la diferente permeabilidad del oxígeno en distintos tipos de terreno. El ataque se sitúa sobre la zona pobre de oxígeno (terreno coloidal,

compacto). Son los fenómenos más agresivos y hacen que estos terrenos se consideren como agresivos. (Ver fig. 4.36)

Si en el caso de la tubería, ésta discurriese por terreno únicamente arcilloso, el mecanismo sería por micropilas, estaría bajo fuerte control catódico y probablemente sería poco relevante.

En cambio, al discurrir por terreno arcilloso y arenoso, la aireación diferencial forma una macropila y un nivel de corrosión muy alto sobre la parte situada en la arcilla.

4.7.9.1 Fenómenos de corrosión originados por corrientes vagabundas o erráticas

En instalaciones industriales con fuerte consumo y de transporte de corriente se pueden producir fugas de corriente a través del suelo. Si una corriente de este tipo (vagabunda) se encuentra con una estructura metálica enterrada, al ser mucho más conductor el metal que el terreno, la mayor parte de la corriente penetra en la estructura. Esa corriente puede salir de la estructura por una zona diferente a la de entrada.

La región de entrada se convertirá en el cátodo y la de salida el ánodo. Por tanto, esas corrientes son capaces de crear sobre la estructura zonas de bajo y alto potencial, que en contacto con un electrolito forman pilas de corrosión.

En función de las condiciones, pueden darse relaciones de áreas muy favorables al cátodo, lo que produciría importante corrosión en el ánodo.

Si la estructura está revestida, la corriente vagabunda saldrá por la zona más conductora, habitualmente zonas con algún defecto en el revestimiento (poros, agrietamiento, etc.) lo que significaría una región anódica todavía más pequeña y por tanto mayor corrosión.

En caso de tratarse de corriente alterna, el efecto corrosivo es aproximadamente 40-50% que si fuese corriente continua (efecto rectificador de los productos de corrosión y los recubrimientos).

Para determinar el riesgo de corrosión se realizan medidas de potencial a lo largo del trazado de la estructura enterrada. Las regiones de entrada serán las de un potencial superior.

Las soluciones más adecuadas son:

- Aislamiento adecuado de los circuitos
- Aislamiento de la estructura enterrada
- Protección de regiones con salida de corriente (protección catódica)

4.7.9.2 Fenómenos de corrosión por picadura en estructuras metálicas enterradas

La corrosión por picadura en estructuras enterradas suele darse en combinación con otros tipos de corrosión. Su origen puede ser por:

- Fenómenos muy locales de aireación diferencial
- Fallos muy locales en revestimientos
- Zonas de salida de corrientes vagabundas de superficie muy restringida
- Regiones de resquicio (zonas roscadas, de solape, ...) donde no se alcanza la corriente de protección en estructuras enterradas protegidas catódicamente.
- Efecto de aniones agresivos en suelos cercanos al mar.

El desarrollo de picaduras se ajusta a relaciones del tipo:

$$P = Kt^n$$

Donde:

P: penetración de la picadura más profunda

t: tiempo

K y n: Constantes según tipo de terreno, metal y geometría de la estructura.

La velocidad de avance de la picadura sería:

$$V = \frac{dP}{dt} = Knt^{n-1}$$

Lo que significa que la velocidad disminuiría más rápido cuanto menor sea n.

Además, la profundidad de las picaduras también depende de la superficie expuesta, siguiendo la siguiente relación:

$$P = bA^a$$

Donde:

A: área expuesta

b: profundidad media de las picaduras

a: cte según características del terreno.

4.8 Aleaciones resistentes a la corrosión

4.8.1 Criterio básico de elección del material

En general, atendiendo única y exclusivamente al mecanismo de la corrosión, para metales con alto riesgo de corrosión electroquímica, conviene utilizar:

- Metales puros (*Mal comportamiento mecánico: solución poco adecuada*)
- Bajos niveles de segregación de impurezas
- O si no, aleaciones monofásicas o bifásicas
- Pequeña diferencia de potencial entre fases
- Bajo nivel de inclusiones
- Estructuras de grano fino
- Metales capaces de formar capas pasivas estables en el medio a operar (*Muy recomendable*)
- Alta velocidad de repasivación (*Muy recomendable*)

4.8 Aleaciones resistentes a la corrosión en torno al sistema ternario Fe-Cr-Ni

Incluye Aceros Inoxidables, Aceros Refractarios y Superalaciones de base níquel.

4.8.1 Aspectos microestructurales

La microestructura de la aleación condiciona su denominación y su comportamiento frente a la corrosión.

La adición de Cr, que es una sustancia ferritizante, supone ampliar el campo de la ferrita y reducción de la austenita. Para % en peso de entre 25 y 65, aparece una fase sigma que endurece y fragiliza el metal, deteriorando el comportamiento mecánico, pero además empeora también la resistencia frente a la corrosión, por lo que se debe evitar.

El aumento de C, que es gammágeno, supone un aumento de la zona estable de la austenita y reduce la de la ferrita, en la que precipitan carburos ricos en Cr (aleación Fe-Cr).

El Ni, gammágeno, aumenta también la fase de la austenita y aumenta la capacidad de temple.

Para el sistema Fe-Cr-Ni:

- La fase sigma se forma con mayor lentitud que en las Fe-Cr.
- Fase sigma estable hasta 920°C y precipita más rápido en estructuras bifásicas ($\alpha+\gamma$) que en las austeníticas.
- Se asume que la fase sigma puede darse en prácticamente todos los aceros inoxidables y refractarios comerciales.

Para visualizar la relación de fases, se puede emplear secciones para contenidos ctes. de hierro (Ver fig. 4.37)

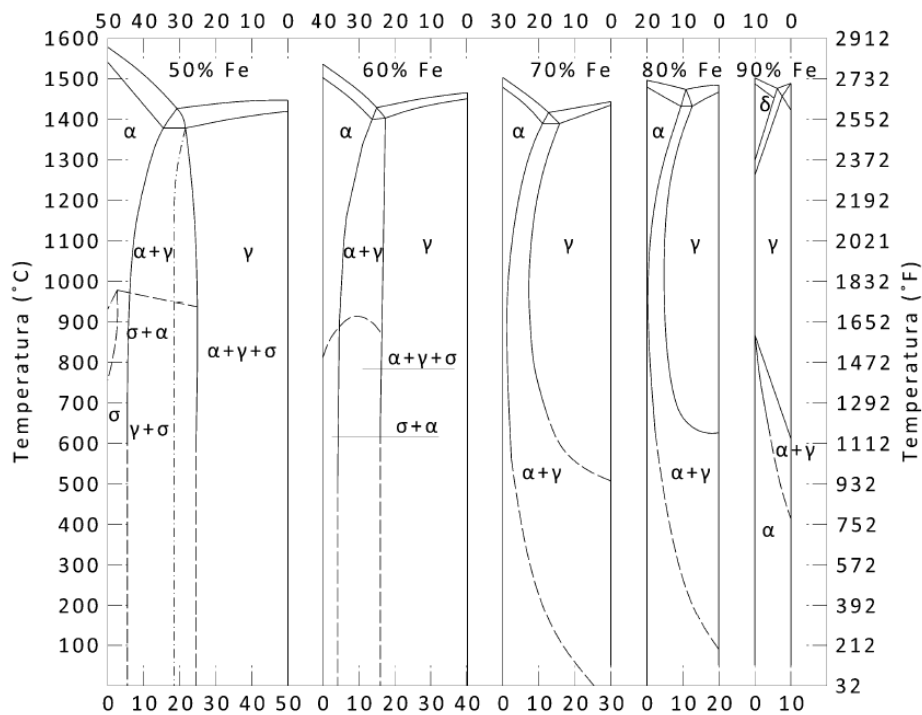


Figura 4.37. Secciones del diagrama ternario Fe-Cr-Ni para distintos contenidos en hierro.

En este gráfico se aprecia cómo según %Fe disminuye, la fase ($\alpha+\gamma$) se extiende, permitiendo aleaciones con contenidos totales de cromo y níquel suficientes para que posean buena resistencia a la corrosión, sin ser totalmente

austeníticas. Estas aleaciones, incorporando normalmente molibdeno, con una relación de fases ferrita-austenita cercana al 50% se llaman Dúplex.

El contenido en C, afecta también a la estabilidad de las fases, ya que estabiliza la austenita y forma carburos que retiran el Cr de la solución sólida. Así, para un 8% de Ni, la austenita se extiende hasta temperatura ambiente, dando lugar a los aceros inoxidable austeníticos, con interesante relación prestaciones/precio.

Otros elementos que influyen en el comportamiento de la aleación son:

- **Molibdeno:** Mejora la resistencia a la corrosión, sobre todo por picadura y a temperaturas elevadas.
- **Niobio y titanio:** Reducen el daño de la precipitación de carburos de cromo y la consiguiente sensibilización a la corrosión intergranular. Constituyen los aceros inoxidable estabilizados. En exceso puede producir agrietamiento en caliente de uniones soldadas.
- **Silicio:** Se emplea principalmente en aleaciones resistentes al calor. También mejora la resistencia a la corrosión electroquímica en aceros inoxidable en contacto con medios muy oxidantes, pues eleva el potencial de transpasivación de la aleación.

4.8.3 Aceros inoxidable

Se ha observado que la adición de cromo a las aleaciones hierro-carbono aportaba a éstas resistencia prácticamente total a la corrosión atmosférica a partir de un **12% en peso**. Estas aleaciones reciben el nombre de **Aceros Inoxidables**.

Se debe a que el Cr suministra a la aleación una **capa pasiva estable** en medios oxidantes. El **potencial oxidante suministrado por el O₂ atmosférico** es suficiente para provocar la **formación** de esta **película pasiva**.

Se clasifican según la microestructura a temperatura ambiente:

I. **Aceros Inoxidables Martensíticos**

Contienen 12-18% de Cr y 0,1-0,5% de C. Su resistencia a la corrosión crece con el contenido de Cr, pero es siempre menor a la del resto, aun así, es eficiente en contacto con la atmósfera, el agua y el vapor.

Mecánicamente tienen gran dureza. Utilizaciones: Palas de turbinas a vapor, válvulas de motores, pernos, tuercas, accesorios para bombas, ejes y hélices marinas, etc. Para trabajar en ambientes marinos, requieren 0,1%C y 16-18%Cr (Grupo IV).

II. Aceros Inoxidables Ferríticos

Contienen de 15% a 30% de Cr, y su contenido de C aumenta al aumentar la proporción de Cr hasta el 0,35%. Son magnéticos, de poca dureza y no templables. Su resistencia a la corrosión es intermedia entre martensíticos y austeníticos (los más resistentes):

- Resisten la corrosión atmosférica únicamente en ambientes rurales y urbanas.
- Resisten el agua de mar si no está estancada ni contiene organismos o microorganismos marinos.
- La acción de pilas locales en contacto con aleaciones de cobre es muy débil.

III. Aceros Inoxidables Austeníticos

El Ni se convierte en uno de los elementos mayoritarios, por encima del 8%, de estructura austenítica. Debido al alto precio del Ni, últimamente se sustituye parte de este componente por Mn o N. Son amagnéticos y no pueden ser endurecidos por temple, pero sí por trabajo en frío. Su resistencia a la corrosión atmosférica, agua y vapor es superior a los anteriores igual que frente a algunos productos químicos. La resistencia a la corrosión por picadura mejora con la adicción de Mo, en medios ácidos con Cl⁻ y en a la corrosión bajo tensión.

Comportamiento en agua de mar:

- Es débil cuando está completamente sumergido y en contacto con depósitos de algas, otros organismos y sustancias inertes.
- El fenómeno de corrosión se presenta habitualmente en picadura o en zonas de resquicio.
- La resistencia en el agua de mar aumenta con el contenido de Cr.
- La adición de Ni mejora mucho la resistencia a la corrosión generalizada.

- La resistencia contra la corrosión localizada es similar a la de los Ferríticos, por lo que es necesario añadir Mo o aumentar el contenido de Cr. (Tabla 4.4)

| Composición | | | | Duración ensayo | Pérdida de peso | Profundidad de las picaduras |
|-------------|-------|------|------|--------------------|--------------------|---------------------------------|
| Cr | Ni | Mo | C | días | mg/dm ² | mm |
| 13,15 | - | - | 0,08 | 568 | 6,70 | 1,4 |
| 17,28 | - | - | 0,10 | 568 | 5,10 | 2,5 |
| 25,40 | - | - | 0,08 | 322 | 3,00 | 1,6 |
| 18,16 | 9,23 | - | 0,08 | 667 | 2,45 | 1,0 |
| 18,43 | 9,41 | - | 0,07 | 438 | 0,70 | Chapa perforada |
| 17,80 | 12,15 | 2,90 | 0,06 | 438 | 0,20 | 1,2 |
| 18,78 | 10,20 | 2,74 | 0,05 | 1923 | 0,60 | 1,0 |
| 24,03 | 20,95 | - | 0,12 | 643 | 0,20 | 0,1 |
| 24,03 | 20,95 | - | 0,12 | 988 | 0,70 | Chapa perforada |

Tabla 4.4. Comportamiento frente a la corrosión de aceros inoxidable de distintas composiciones en contacto con agua de mar en movimiento.

IV. Aceros Inoxidables Dúplex

Se caracterizan por la presencia de una estructura bifásica de granos de ferrita ($\delta+\alpha$) y austenita (γ), con fracciones de ambas cercanas al 50%. Además, contienen 4 elementos de aleación principales: Cr, Ni, Mo y N, y en algunos casos pueden presentar otros elementos: Si, Cu, W, Mn.

Su comportamiento frente a la corrosión es su característica más importante:

- Resistencia frente a medios agresivos similar o superior a los austeníticos.
- Prácticamente inmunes a la corrosión intergranular, debido a la precipitación de carburos de Cr.
- Resistencia a picadura y en resquicio, en general, superior a los austeníticos. Debido sobre todo a una concentración equilibrada de elementos de aleación en cada una de las fases mayoritarias, lo que proporciona capas pasivas de alta estabilidad.

- La presencia de fases secundarias reduce de manera relevante la resistencia a picadura y resquebrajamiento, ya que facilita el ataque localizado por disolución selectiva.
- Buen comportamiento ante fenómenos de corrosión bajo tensión en presencia de cloruros, sustituyendo en muchas aplicaciones a los aceros austeníticos.

4.8.4 Aleaciones de base cobre resistentes a la corrosión

Cobre

Es un metal caracterizado por su alta conductividad eléctrica, calorífica, resistencia a la corrosión, ductilidad y color.

Frente a la corrosión, al ser un metal relativamente noble, presenta en general buen comportamiento en aplicaciones en:

- Agua de mar
- Aguas dulces (calientes o frías). Especialmente adecuado para conducir aguas blandas con mucho O_2 disuelto y bajo contenido en ácido carbónico. Ej: Tuberías de agua doméstica.
- Ácidos desaireados, ácido sulfúrico diluido, ácido fosfórico, acético y otros ácidos no oxidantes.
- Exposición atmosférica.

En cambio, su resistencia a la corrosión es débil en contacto con:

- Ácidos oxidantes (HNO_3 o H_2SO_4 concentrado) y ácidos oxidantes aireados (carbónico).
- NH_4OH con O_2 , por formación del ión $CU(NH_3)_4^{2+}$, que despolariza la reacción anódica.
- Soluciones acuosas y aguas aireadas a elevada velocidad (corrosión-erosión) por ser un metal blando.
- Sales oxidantes de metales pesados
- H_2S , S y algunos otros compuestos derivados del S.

Latones

Son aleaciones de cobre con un 50% de cinc como máximo (para ser aleaciones de base cobre). Las aleaciones con menos de un 40% de cinc presentan las propiedades esenciales del cobre, pero a menor precio.

Ante la acción corrosiva de los agentes atmosféricos, es menos resistente que el cobre, pero resiste perfectamente la acción del agua y el vapor recalentado. También resiste bastante bien la acción de agua de mar, pero no la acción de ácidos sulfúrico y clorhídrico.

Mejora el ataque por cavitación, al presentar mejores propiedades mecánicas, por lo que se emplea en tubos de condensación.

Los fallos por corrosión en latones se presentan, en general, por descincificación, picaduras o grietas bajo tensión. Excepto el ataque por picadura, los otros efectos se pueden reducir reduciendo el % de cinc.

También es habitual el uso de latones al estaño (Aleación Cu-Zn con algo de Sn) para la fabricación de maquinaria marina, por su menor precio que el bronce.

Bronces

Tradicionalmente se denominaba así a la aleación de cobre con estaño, pero actualmente se usa para todas las aleaciones binarias del cobre con todos los metales excepto con el cinc. Los bronces se pueden clasificar en:

- Ordinarios: Aleación Cu-Sn.
Características:
 - 1) Buena resistencia al rozamiento
 - 2) Excelente moldeabilidad y resistencia a la corrosión
 - 3) Buena sonoridad
- Especiales: Aleación Cu-otro metal (bronce aluminio, bronce al plomo, etc.)

4.8.5 Aleaciones Cu-Ni, Cu-Al y Cu-Be

Cu-Ni y Cu-Al se emplean fundamentalmente para tubos de condensadores.

En caso de aguas dulces no contaminadas, se emplea Cu, Cu-Ni y latón al aluminio.

Para aguas contaminadas, el latón al aluminio sufre ataque por picadura, por lo que es preferible el cuproníquel.

Las aleaciones cuproníquel son resistentes, en especial, al agua de mar a gran velocidad, cuando contienen pequeñas cantidades de Fe y Mn. También tienen mejor comportamiento ante la corrosión bajo tensión.

Los cobres de berilio son una generación reciente. Se conforman en caliente y en frío y tienen una notable combinación de propiedades de resistencia a la corrosión y al desgaste en presencia de lubricantes (Ej: cojinetes para turbinas de turborreactores, muelles, ...)

4.8.6 Aleaciones ligeras resistentes a la corrosión

4.8.6.1 Aluminio y sus aleaciones

El aluminio es un metal ligero con buena resistencia a la corrosión en la atmósfera y en muchos medios acuosos, con buena conductividad térmica y eléctrica. Es muy activo en la serie electroquímica, pero se pasiva simplemente con la exposición al agua o al aire, con lo que su potencial de reducción aumenta de forma considerable. La película pasiva se compone de óxido de aluminio.

El comportamiento del aluminio es sensible a pequeñas cantidades de impurezas en el metal. Así, el metal puro es más resistente que el comercial y éste que las aleaciones de aluminio. Por ello, alear el aluminio tiene como objetivo principal aumentar su resistencia y no su comportamiento frente a la corrosión.

- Los iones de Cl^- , Fe^{3+} o Cu^{2+} , en agua rompen la película pasiva. (Mal comportamiento en agua de mar).
- Forma pilas galvánicas con Cu o Fe.
- Corrosión en ácidos y álcalis mayor que en agua.
- Resiste bien en agua destilada, frente a la atmósfera y en ciertos ácidos.
- Buena resistencia frente al S, H_2S .

Se emplea en la fabricación de piezas resistentes y ligeras (industria aeronáutica, vagones de tren, etc.); culatas, cárteres, y émbolos de motores; en puertas y ventanas para la edificación; en construcción naval se emplean ciertas aleaciones con buena resistencia a la corrosión marina.

4.8.6.2 Magnesio y sus aleaciones

Es un material de poca resistencia mecánica y plasticidad en estado puro, lo que obliga a emplearlo en aleación y endurecido por tratamiento térmico.

Además, su resistencia a la corrosión es baja, debido a su elevada electroactividad. Su resistencia a la corrosión es muy dependiente de la presencia de impurezas (Fe, Ni, Cu, etc.), que la disminuyen considerablemente. En cambio, la presencia de otros elementos (Mn o Zn) aumenta la tolerancia a estas impurezas.

Para mejorar su comportamiento frente a la corrosión, se emplean técnicas como el láser para fusión superficial, o incorporando polvo cerámico o de un metal más resistente a la corrosión como el Al.

En general, tiene buen comportamiento frente a la corrosión en:

- Exposición atmosférica: Para aleaciones liberadas de tensiones.
- Agua destilada
- HF en bajas concentraciones
- Álcalis hasta 60°C

4.8.6.3 Titanio y sus aleaciones

Son materiales de reciente incorporación. El metal puro tiene baja densidad, elevado punto de fusión y alto módulo elástico.

Las aleaciones mejoran la resistencia, ductilidad, facilidad de forja y mecanizado. Tienen una gran resistencia a la corrosión, siendo inmunes a la exposición atmosférica, marina y a una gran variedad de medios de la industria química.

Sus principales aplicaciones son en la industria aeroespacial, por ejemplo, aleado con aluminio y vanadio.

En cambio, tiene peor comportamiento a altas temperaturas (>600°C) por oxidación. Para mitigarlo, se hacen implantes iónicos de wolframio o de metales nobles, y la nitruración para su protección superficial.

4.8.6 Materiales metálicos resistentes a la corrosión de desarrollo más reciente

4.8.7.1 Aleaciones obtenidas por solidificación rápida. Vidrios metálicos

Se consiguen mediante un enfriamiento rápido, lo que produce una estructura amorfa, como un vidrio.

Se trata principalmente de aleaciones de base aluminio junto con Li, ZnMg y Cu, y de base Fe con Cr, Mo y el grupo Fe-P-Cr.

Las de base aluminio presentan buena resistencia a la corrosión bajo tensión y otros habituales en estructuras.

La adición de Cr en las aleaciones de base Fe, Ni o Co aporta buena resistencia a la corrosión en medios ácidos, siendo el % de Cr necesario, inferior al necesario en las aleaciones convencionales para formar la capa pasiva.

En general, una aleación amorfa metal-metaloide con un sólo componente metálico posee menor resistencia a la corrosión que el metal puro, pero al añadirle por lo menos otro elemento, la velocidad de corrosión decrece.

Por tanto, se trata de vidrios metálicos extraordinariamente inertes frente a medios químicos de alta agresividad, pero no es posible de momento para fabricar secciones macroscópicas debido a la necesidad de un rápido enfriamiento y se trata de procesos caros.

4.8.7.2 Superaleaciones para alta temperatura

Se trata de aleaciones en torno al sistema Fe-Cr-Ni capaces de operar por encima del límite de los aceros al carbono (550°C).

Desde el punto de vista de la corrosión, a temperatura elevada, predomina la corrosión por oxidación directa, sin necesidad de electrolito ni formación de mecanismo electrolítico, salvo aparición de sales fundidas en la superficie metálica.

La resistencia de estas superaleaciones es función principalmente de su contenido en cromo. La presencia de vanadio o metales alcalinos en los motores aeronáuticos acelera notablemente la corrosión de estas aleaciones.

Estas superaleaciones se dividen en dos grupos: las de base cobalto y las de base níquel.

4.8.7.3 Recubrimientos para alta temperatura. Barreras térmicas.

En ciertas aplicaciones a alta temperatura no es posible el empleo de material desnudo, aunque se trate de materiales de alta resistencia como las superaleaciones, por lo que puede ser necesario considerar la aplicación adicional de un recubrimiento protector.

Los fenómenos más importantes de degradación son:

- Procesos de oxidación
- Exfoliación de capas oxidadas protectoras (Al_2O_3 y Cr_2O_3)
- Corrosión acelerada en presencia de otros oxidantes distintos al oxígeno (S, C y derivados)
- Pérdida de propiedades mecánicas por efecto de los propios efectos de corrosión a alta temperatura, por choque térmico o fatiga térmica.
- Corrosión acelerada por depósitos (Ej: V_2O_5) y sus mezclas con sulfatos y/o cloruros alcalinos
- Corrosión-erosión

Estos recubrimientos son habitualmente de naturaleza cerámica, y logran prolongar la vida útil del componente, aunque también pueden influir negativamente en el metal a proteger o sufrir el propio material protector un deterioro prematuro.

La implantación de estas protecciones se realiza mediante:

- Difusión
- Implantación iónica
- Láser por CVD (depósito químico de vapor) y PVD (deposición física de vapor)
- Proyección térmica

Los materiales más recientes son de tecnología nanométrica que mejoran la capacidad para evitar agrietamiento por corrosión o choque térmico.

La corrosión es un problema industrial importante, pues puede causar accidentes por la ruptura de una pieza; y, además, se estima que entre el 3 y el 4% del producto internacional bruto de un país se pierde como consecuencia de la degradación de los materiales. El ambiente marino es uno de los ambientes más corrosivos que se producen en la naturaleza, ya que se pueden producir todos los tipos de corrosión.

Este trabajo pretende dar una visión cronológica de la evolución de los estudios en la corrosión de las últimas décadas.

El primer bloque trata de la caracterización de la corrosión, es decir, de los estudios que se han preocupado por analizar el tipo de corrosión que se produce en diferentes ambientes marinos.

En el segundo bloque, se estudian los modelos numéricos propuestos para simular la corrosión.

En el tercer bloque, se trata la corrosión en armaduras de hormigón; y, por último, en el cuarto, se exponen distintos estudios, en los que se analiza la corrosión en distintos ambientes no marinos.

4.9 Caracterización de la corrosión

En 1990, "Cathodic protection of aluminum in seawater" [1], intenta aclarar los mecanismos de la protección catódica en aleaciones de aluminio en agua marina.

Si bien el aluminio se caracteriza por su buen comportamiento ante la corrosión, si está sumergido en agua marina, puede ser necesario protegerlo catódicamente. El estudio compara la densidad de corriente necesaria para la protección catódica del aluminio, con la necesaria para el acero, y concluye que, para el aluminio, la densidad de corriente necesaria es significativamente menor que para el caso del acero. Esto se debe a que la capa de óxido superficial es más densa en el aluminio, de forma que la pasivación espontánea es más efectiva.

En 1991, "Scanning reference electrode technique for the investigation of preferential corrosion of weldments in offshore applications" [2], plantea el uso de la técnica de escaneo de electrodos para el estudio de la corrosión en soldaduras en ambientes marinos.

Este método es una técnica de aplicación muy rápida, de apenas unas horas. Al sumergir una soldadura en un electrolito, se generan campos de potencial, debido a las áreas anódicas y catódicas de la soldadura.

El artículo analiza la posibilidad de aplicar esta técnica en el estudio de la corrosión en soldaduras, comparando para ello los análisis de muestras expuestas a corrosión acelerada, corrosión a largo plazo, y en inmersión, de las

que se conoce su estado por otras técnicas, con los análisis mediante escaneo de electrodos.

En vista a los resultados obtenidos, los autores concluyen que la técnica de escaneo de electrodos es una técnica válida para analizar la corrosión en soldaduras.

En 1993, "Initiation of crevice corrosion by stray current on stainless steel propeller shafts" [3], estudia las causas de la corrosión por picaduras en los ejes de hélices de barcos.

En árboles de transmisión de barcos de nueva construcción se han originado picaduras graves en sólo doce días. El casco de los buques está protegido mediante ánodos galvánicos de zinc, pero no existe ninguna protección catódica local para el eje o en los prensaestopas. Aunque las picaduras aparecen en todo el eje, la corrosión es más grave en el entorno de los rodamientos del eje.

El inicio de las picaduras se debe a la existencia de corrientes parásitas a través de los ejes, y el rozamiento de los rodamientos provoca que la corrosión se produzca a tan corto plazo. Estas corrientes parásitas se pueden evitar con un sistema de toma de tierra en el eje.

En 1996, "Mechanistically based prevention strategies of flow-induced corrosion" [4], se estudia la corrosión debida al flujo de un fluido. El estudio llega a la conclusión que la corrosión originada por el flujo de un fluido se debe a dos mecanismos: la corrosión por erosión, en la que las partículas del fluido desgastan la capa de pasivación; y la corrosión por cavitación, que se produce debido al arrancamiento de la capa pasiva por la implosión de las ondas de presión que provoca la cavitación.

En 1999, "Polyaniline as marine antifouling and corrosion-prevention agent" [5], analiza el uso de un recubrimiento como prevención anticorrosión.

Una parte muy importante de los procesos de corrosión en ambientes marinos se deben a las incrustaciones de diversos organismos, como son bacterias, hongos y algas. Una de las soluciones más empleadas para evitar este

tipo de corrosión es emplear un recubrimiento protector que no sea atacado por estos organismos.

En este estudio, se propone el uso de polialinina como recubrimiento no tóxico, para evitar daños medioambientales, obteniéndose buenos resultados anticorrosivos en los experimentos realizados.

En 2000, "Detection of crevice corrosion of steels in seawater by optical interferometry" [6], plantea el uso de interferometría óptica como detección de la corrosión por grietas a corto plazo en ambientes marinos.

El principio básico de la técnica de interferometría óptica es relativamente simple: se emite un haz de luz visible se divide en dos, uno se dirige hacia la superficie de referencia interna y el otro hacia la muestra en estudio. Después de la reflexión, los dos haces se vuelven a combinar dentro del interferómetro produciendo el fenómeno de interferencia constructiva y destructiva, el cual genera un patrón de franjas brillantes y oscuras, que dan cuenta de una imagen punto a punto de la muestra. La intensidad de luz de cada punto depende de la diferencia de trayectoria entre los dos haces. Registrando este patrón, se puede procesar esta información. Las pequeñas imperfecciones de la superficie de referencia producen cambios en este patrón, con lo que se puede evaluar la rugosidad de la superficie de forma muy rápida sin necesidad de que exista contacto físico con la muestra.

El estudio demuestra que esta técnica es una técnica rápida y eficaz tanto para detectar grietas como para detectar corrosión

Conocer la corrosión en función del clima de distintos materiales permitirá elegir el que mejor se adapte a las condiciones meteorológicas. En esta predicción, sin embargo, inciden varios factores: la meteorología de la zona; que exista, o no, libre acceso del medio corrosivo a la superficie de metal expuesta a la atmósfera; la forma de la superficie que se corroe, que puede provocar la acumulación de agua en algunas secciones; y factores internos, como son los procesos de fabricación de metal. Por ello, se elaboran mapas de corrosión, que pretenden establecer zonas geográficas con distintas velocidades de corrosión.

En 2001, “Estudio de la corrosión atmosférica del zinc y el acero galvanizado” [7], estudia la relación entre la meteorología en Canarias y la corrosión de aceros expuestos a la intemperie, para establecer un mapa de este archipiélago.

El principal rasgo climático de Canarias es una dinámica atmosférica tropical, y la influencia de lo abrupto del terreno. En el archipiélago, se suceden diferentes situaciones climáticas: normalmente, existe cierta estabilidad, pero puede producirse invasión de aire sahariano, borrascas oceánicas, gota fría, e incluso invasiones de aire polar. El relieve establece la distribución de las precipitaciones, y produce el estancamiento de una masa nubosa en las laderas, generándose así un ambiente saturado de humedad, que puede dar lugar a condensaciones importantes. Las temperaturas son suaves, y la amplitud térmica no es especialmente importante.

Para el estudio, se dispusieron probetas de cinc y acero galvanizado junto estaciones meteorológicas, durante tres años, para así correlacionar la meteorología con la corrosión.

A partir de datos meteorológicos y de velocidad de corrosión, correspondientes al primer año de exposición, el autor establece los índices de corrosividad del cinc de las diferentes atmósferas de la provincia de Santa Cruz de Tenerife en las que se han instalado las estaciones.

En las atmósferas de tipo rural, la capa de carbonato de cinc inicialmente formada, sigue creciendo lentamente, observándose que la velocidad de penetración de la corrosión disminuye, de forma aproximadamente lineal con el tiempo de exposición, lo que pone en evidencia su carácter protector. En placas de cinc expuestas en atmósferas marinas, y como consecuencia del depósito del ion cloro, a los pocos días de exposición se forman, sobre la superficie del metal, islas de cloruro básico, que van creciendo lateralmente hasta unirse y cubrir toda la superficie. En estas condiciones, la velocidad de corrosión que se mide, no disminuye de forma lineal con el tiempo, lo que para el autor indica que el cloruro básico de cinc es menos protector que el carbonato básico. Se establece una ley logarítmica para la velocidad de corrosión del zinc, y además, el autor concluye

que, a pesar de la elevada tendencia a la corrosión del zinc, la velocidad de corrosión es inferior a la del acero.

En 2002, “Application of EIS and SEM to evaluate the influence of pigment shape and content in ZRP formulations on the corrosion prevention of naval steel” [9], evalúa la corrosión en aceros protegidos con pinturas de alto contenido en cinc, mediante el uso de espectroscopia de impedancia y del microscopio electrónico de barrido. De esta forma, se calculan que espesores de pintura mejoran el comportamiento ante la corrosión. Además, el estudio concluye que es preferible usar zinc laminar frente al zinc esférico como componente en dichas pinturas.

En 2002, “A failure analysis study of wet liners in maritime diesel engines” [8], analiza la corrosión en camisas de motores diésel.

En algunos motores diésel de fragatas marinas se produce el fallo del motor por el agrietamiento de las camisas del cilindro. El agrietamiento se produce en el entorno de la ranura de refrigeración de agua de la camisa. Por dicha ranura circula agua de refrigeración, a alta presión y velocidad para evitar la ebullición. En la ranura se produce concentración de tensiones. Debido a los ciclos de paro y arranque del motor, las camisas están sometidas a ciclos de fatiga, agravando esta concentración de tensiones. Este agrietamiento hace necesario sustituir completamente las camisas del motor, con el coste que ello supone.

Inicialmente, se modificó el diseño de la ranura de las camisas para evitar la concentración de tensiones. A pesar de ello, con este diseño se generan picaduras, a pesar de que el líquido refrigerante es anticorrosivo. Estas picaduras provocan de nuevo el agrietamiento de las camisas.

El estudio propone sustituir el acero empleado en la fabricación de las camisas por un acero de mayor resistencia a tracción, suponiendo que las picaduras se deben a que, a pesar del nuevo diseño, la concentración de tensiones sigue siendo demasiado grande.

En 2003, “Characterization of corrosion products formed on steels in the first months of atmospheric exposure” [9], se identifican los componentes

principales de la capa de óxido formada en aceros al carbono y aceros de resistencia a la intemperie, expuestos a la corrosión atmosférica en tres ambientes diferentes: zona de bosque tropical, zona industrial, y zona urbana. Las técnicas para la caracterización de los componentes son la difracción de rayos X y el microscopio Raman. De nuevo en 2003, "Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere" [10], propone un mecanismo de corrosión del acero corten en ambiente marino.

En las muestras estudiadas, durante el primer año de exposición a la intemperie, no hay diferencias en la velocidad de corrosión del acero corten respecto al acero al carbono. Sin embargo, en esta primera fase, la corrosión en el acero al carbono se produce por picaduras, mientras que en el acero corten, la capa de óxido se hace cada vez más densa, generándose así la capa de protección que caracteriza al acero corten. Sin embargo, estas capas del acero corten no impide el ataque de cloruros, característico del ambiente costero. De esta forma, se explica porque en este tipo de ambiente, la capa pasiva no llega a estabilizarse.

En 2004, "Application of Mössbauer Spectroscopy to the Study of Corrosion" [11], se analiza la posibilidad de usar el espectrómetro Mössbauer como técnica de análisis de la corrosión. De esta forma, se puede identificar la corrosión en estructuras de acero o hormigón armado.

La espectroscopia Mössbauer es un método de ensayo no destructivo, que permite su aplicación in situ. Esta técnica se basa en la emisión y la absorción resonante de rayos gama en sólidos. De esta forma, pueden identificarse compuestos, y su estructura granular con mayor precisión que la difracción de rayos X, por lo que los autores concluyen que el espectrómetro Mössbauer es una técnica válida y muy útil para caracterizar la corrosión.

También en 2004, "Corrosión en uniones solapadas de aceros recubiertos" [12], Chico González publica su tesis doctoral, en la que se estudian los mecanismos de corrosión en los resquicios de uniones solapadas.

En las estructuras metálicas, las uniones solapadas tienen problemas de durabilidad debido a diversos procesos de corrosión que se inician en estas zonas críticas de solapamiento: corrosión en resquicios o corrosión galvánica si

hay metales distintos. Para evitar la corrosión, se emplean recubrimientos de distintos tipos.

Para analizar la corrosión en las diversas probetas se usa espectroscopia de impedancia electroquímica. La principal causa de corrosión en las uniones es la retención de humedad en el interior, pero a pesar de ello, es necesaria la presencia de oxígeno para que se produzca corrosión. Además, concluye que los ensayos de corrosión acelerados no son válidos en estos casos, ya que existe cierto retraso en la degradación al natural del material en comparación con la degradación en la cámara de ensayo.

En 2005, "Evaluation of deoxygenation as a corrosion control measure for ballast tanks" [13], se estudia la posibilidad de reducir la corrosión en los tanques de lastre mediante la desoxigenación del agua de mar.

La desoxigenación del agua de mar en los tanques de lastre es el tratamiento que se emplea para controlar la introducción de especies biológicas no autóctonas. Por ello, el estudio se plantea usar este mismo tratamiento para evitar la corrosión.

El estudio concluye que, si bien la desoxigenación del agua reduce la corrosión, sin embargo, con los sucesivos ciclos de oxigenación y desoxigenación, la corrosión se incrementa hasta el punto de volverse incontrolable. Por ello, no se recomienda su uso como medida de protección contra la corrosión, pero podrían plantearse métodos anticorrosión mediante la desoxigenación del agua, siempre que no hubiese renovación del agua o captación de oxígeno.

En el año 2006, "Composition and protective ability of rust layer formed on weathering steel exposed to various environments" [14], analiza la corrosión del acero Corten según las características atmosféricas, durante veinte años de exposición.

Cuando apenas existe presencia de cloruros en el ambiente, el factor más significativo en la estabilización de la capa pasivante del acero corten es la relación de austenita y ferrita. En ambientes costeros hay una alta concentración de cloruros en el ambiente, por lo que la capa de óxido puede no estabilizarse,

continuando la corrosión en el interior. El artículo estudia la correlación entre la relación de austenita y ferrita en ambientes con presencia de cloruros.

En general, en la capa de óxido, aumenta la concentración de ferrita según aumenta el tiempo de exposición de la muestra, sin embargo, en presencia de cloruros, la ratio de ferrita y austenita no aumenta. De esta forma, se puede definir la capacidad de protección de la capa de óxido con la relación entre ferrita y austenita.

En 2007, "Atmospheric corrosion performance of carbon steel, galvanized steel, aluminium and copper in the north Brazilian coast" [15], elabora un mapa de corrosión en Brasil.

Mediante estaciones de corrosión atmosférica, se caracteriza la corrosión de la región de Sao Luis, en el norte de Brasil, para acero, cobre y aluminio. La región de Sao Luis se caracteriza por su alta temperatura media, y con un alto índice de humedad relativa, que favorece la aparición de la corrosión.

El factor más relevante para la corrosión en esta región es la proximidad al mar: la mayor cercanía al mar hace aumentar la presencia de cloruros en el ambiente, favoreciendo así la corrosión.

También en 2007, "Characterisation of initial atmospheric corrosion carbon steels by field exposure and laboratory simulation" [16], se analizan los productos de corrosión del acero durante sus etapas iniciales de corrosión atmosférica, comparando los productos de corrosión que se obtienen en simulaciones en el laboratorio, con muestras expuestas a la naturaleza. De esta forma, se encuentra que existe una mayor concentración de azufre en las muestras expuestas al natural.

Por otra parte, también en 2007 "Evaluación de la modificación de elementos aleantes (Mo, Mn, Ti) en el comportamiento frente a la corrosión de aceros inoxidables austeníticos" [17], Coy Echeverría estudia el efecto conjunto de las adiciones de molibdeno y manganeso, y su influencia en la resistencia a la corrosión, tanto generalizada como por picadura. Además, estudia la influencia del titanio en la resistencia a la corrosión intergranular del acero.

Ensayando diversas muestras, se establecen los mecanismos de actuación de estos elementos aleantes en el comportamiento de la capa pasiva y en los cambios microestructurales. En general, el molibdeno mejora la resistencia a la corrosión, estabilizando la capa pasiva. Sin embargo, la adición de manganeso disminuye la temperatura crítica de picadura, favoreciendo así su generación. Por otra parte, el titanio mejora la resistencia a la corrosión intergranular, pero el efecto de disminuir el contenido en carbono es mucho más significativo.

En el mismo año, “Mössbauer Effect of Rust Layer Formed on Steel in Different Marine Corrosion Zones” [18], analiza de la estructura y composición de capas de corrosión de muestras expuestas en China, y las diferencias entre zona de salpicadura e inmersión, mediante el uso de espectroscopia Mössbauer.

Como ya hemos visto, la espectroscopia Mössbauer es un método de ensayo no destructivo, que permite identificar compuestos, y conocer su estructura granular in situ.

También en 2007, “Significance of Hydrogen Evolution During Cathodic Protection of Carbon Steel in Seawater” [19], analiza la importancia de la generación de depósitos calcáreos en aceros expuestos a ambientes marinos.

Los depósitos calcáreos en la superficie del acero pueden reducir en la tasa de difusión del oxígeno, modificando así el comportamiento ante la corrosión del acero protegido catódicamente. Sin embargo, el desprendimiento de hidrógeno que acarrean estos depósitos calcáreos pueden provocar la fragilización por hidrógeno.

Además, en 2007 también se publica “Taxonomy for protective ability of rust layer using its composition formed on weathering steel bridge” [20], las evaluaciones de la capa de corrosión de un puente de acero corten.

Si bien los aceros corten no necesita mantenimiento, son necesarias inspecciones periódicas, y algunas rehabilitaciones, para prolongar su vida útil, ya que en algunos ambientes la capa de corrosión puede no estabilizarse. En general, la mera inspección visual de la superficie se considera suficiente para evaluar el estado del acero, pero este es un método no cuantitativo, que depende de la experiencia del examinador, por lo que se usa el índice de Capacidad de

Protección como estimación de la calidad capa de óxido. Este artículo analiza la utilidad de este índice en el caso de puentes de acero corten, e intenta buscar una correlación entre corrosión y la relación de austenita y ferrita, encontrando que cuando la concentración de austenita es menor que la de ferrita, la capa de óxido protegerá al acero. En el caso contrario, la capa no se estabilizará. De esta forma se puede valorar fácilmente la durabilidad de un puente construido con acero corten.

En 2008, “Corrosion Fatigue Crack Growth Rate for Petroleum Refining Pressure Vessel Materials” [21], ensaya distintos aceros para analizar los efectos de la tensión de fluencia, la temperatura, y la concentración de impurezas, en la resistencia a grietas por corrosión por fatiga.

La corrosión por fatiga se debe a tensiones cíclicas, que provocan desplazamientos en el interior de los granos del material. En estas bandas de desplazamiento se rompe la capa pasivante, lo que genera zonas anódicas y catódicas en la propia superficie del metal. De estas formas se generan picaduras profundas, en las que se produce el mismo mecanismo de corrosión que en la corrosión por grieta.

Además, ciertos mecanismos de corrosión provocan la liberación de átomos de hidrógeno en el ambiente. El átomo de hidrógeno liberado se difunde intersticialmente, y se introduce en la red cristalina del metal, creando una pequeña deformación en la red cristalina. Si estos átomos de hidrógeno se acumulan, dan lugar a burbujas de gas que provocan grandes presiones internas, que pueden ocasionar microgrietas internas, aumentando la fragilidad del material.

En las refinerías, muchos recipientes están sometidos a altas presiones y temperaturas, en un ambiente rico en hidrógeno. Por ello, son frecuentes las fracturas frágiles debido a estos ciclos de llenado y vaciado de los recipientes.

El estudio concluye que las formas de los ciclos de tensión influyen en el mecanismo de fragilización por hidrógeno, dependiendo de cómo de gradual sea el ciclo de carga y descarga: en el caso de carga rápida y descarga lenta, la fragilización por hidrógeno es mayor que en el caso de carga lenta y descarga rápida.

En 2008, “Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres” [22], estudia la corrosión a largo plazo, de acero, cobre y aluminio, en ambientes costeros tropicales.

En la península de Yucatán y Cuba, se estudia la corrosión en diferentes muestras expuestas directamente al aire libre, protegidas o en interior. La principal causa de corrosión es la presencia de cloruros debido a la proximidad al mar, y depende de la estación del año, debido al efecto del lavado de la lluvia. La mayor corrosión se produce en muestras protegidas, y para las muestras están expuestas en ambientes cerrados, la corrosión disminuye considerablemente.

En vista de los resultados, el estudio propone revisar el nivel de corrosión de las zonas tropicales costeras en el estándar ISO.

En 2008, “The role of rusts in corrosion and corrosion protection of iron and steel” [23], estudia la influencia de las reacciones químicas en la capa de corrosión en los aceros tipo corten.

En general, los aceros corten expuestos a la intemperie se corroen formando una capa pasivante, que logra que no se pierdan apenas las propiedades mecánicas del acero. Sin embargo, hay casos en los que esta capa oxidada acelera la corrosión. Para que la capa oxidada sea efectiva contra la corrosión, es necesario que sea densa, por ello, es importante una rápida velocidad de corrosión inicial.

En 2009, “Corrosion resistant material selection for the manufacturing of marine diesel exhausts scrubbers” [24], analiza el uso de titanio y de acero para evitar la corrosión en el escape de motores diésel marinos.

La forma general de reducir las emisiones de azufre es realizar un lavado por pulverización de agua de mar en los gases de escape. De esta forma, se aprovecha la alta solubilidad del dióxido de azufre, que reacciona en el agua generando ácidos sulfuros y sulfúricos. Por lo tanto, en la zona de lavado, existe; un rango muy amplio de temperaturas, debido al agua de mar fría y a los gases del escape calientes; un pH bajo; y altos contenidos de cloruro. Con todas estas circunstancias, la corrosión en la zona que se produce el enfriamiento y

condensación de los ácidos es especialmente grave. El estudio pretende elegir un material con buena resistencia a largo plazo tanto a esfuerzos como a corrosión.

Los autores concluyen que el titanio soporta mejor la corrosión que el acero, sin embargo, el acero de calidad, con soldaduras sin defectos, es una solución válida.

En 2010, "Comparison of the corrosion of bulk amorphous steel with conventional steel" [25], compara la resistencia ante la corrosión de metales amorfos basados en hierro frente al acero convencional.

Los metales amorfos son materiales metálicos con una estructura vidriosa. Los vidrios metálicos masivos son aleaciones que se enfrían con una tasa de enfriamiento lo suficientemente baja para permitir la formación de estas estructuras amorfas. Esta estructura vidriosa implica una menor contracción durante el enfriamiento, y una mayor resistencia a la deformación plástica. La ausencia de bordes de grano, conlleva a una mayor resistencia al desgaste y a la corrosión. Su principal inconveniente es que no son dúctiles a temperatura ambiente. Las aleaciones amorfas se idealizan como físicamente y químicamente homogéneas. Sin embargo, en la práctica, no puede evitarse la presencia de defectos, al menos en la producción comercial. Algunos vidrios metálicos muestran que estos materiales tienen una gran susceptibilidad a la corrosión por picaduras. Además, su concentración más alta de metaloides, en comparación con aleaciones cristalinas convencionales puede alterar significativamente su comportamiento a la corrosión, dependiendo de la naturaleza de los metaloides y en los otros elementos constitutivos de la aleación. El objetivo de este trabajo es comparar el comportamiento de la corrosión de la una aleación de acero vítrea con su correspondiente aleación cristalina.

La aleación de acero amorfo muestra una mejora ante el comportamiento a la corrosión en todos los ambientes que se estudian. A pesar de ello, su estructura compleja hace que el comportamiento a la corrosión dependa del valor pH del entorno, de forma que, en soluciones muy básicas, la tasa de corrosión puede superar a la del acero cristalino.

En 2011, “Long-term atmospheric corrosion of mild steel” [26], detalla la morfología de las películas de productos de corrosión a largo plazo en aceros después de trece años de exposición atmosférica.

A largo plazo, puede decirse que la corrosión en ambiente rural y urbano es moderada, pero elevada en ambientes industriales y marinos.

En 2012, “Analysis of short term steel corrosion products formed in tropical marine environments of Panamá” [27], estudia la corrosión a corto plazo en Panamá de aceros con carbono, y su correlación con la meteorología y polución.

Los principales factores que afectan a la corrosión atmosférica son la presencia de cloruros, el tiempo de humectación, y el lavado de los contaminantes de la superficie del metal debido al agua de lluvia.

Los autores proponen una ley bilogarítmica que establece la relación entre pérdida de masa debida a la corrosión, con el tiempo de exposición.

En 2012, “Systematic study of the corrosion properties of selected high-resistance alloys in natural seawater” [28], determina los potenciales críticos de protección anódica para los cuales se inicia la corrosión por grieta y por picadura, para un rango de temperaturas entre cinco y cuarenta grados centígrados, que es la temperatura habitual a la que ocurre la corrosión en el agua de mar.

En aleaciones de alta resistencia, los principales procesos de corrosión son la corrosión por grieta y la corrosión por picadura. Esto se debe a que, debido a la calidad de la capa pasivante, la corrosión se debe a defectos puntuales de la zona pasiva. En general, la corrosión en grieta se considera una forma de corrosión más agresiva, ya que se producirá en condiciones menos severas.

Generalmente se asume que la corrosión en grietas ocurre sólo si el potencial de corrosión es mayor o igual que un potencial crítico. Por ello, si en un medio que favorece la corrosión en grietas, se aplica un potencial constante, mayor que el potencial de repasivación, se detectan tres regiones características: La primera es la pasivación, caracterizada por una corriente de pasividad que disminuye en el tiempo. La segunda consiste en la nucleación y propagación de la corrosión en grietas, y se caracteriza por el aumento de la

corriente; mientras que la última etapa es la repasivación, en la cual la corriente disminuye en el tiempo.

Debido a que estos procesos dependen de la microestructura de la aleación del acero, el estudio concluye que la mejor forma de evaluar la corrosión por grieta es mediante potenciales de repasivación.

En 2012, “Mechanical and electrochemical deterioration mechanisms in the tribocorrosion of Al alloys in NaCl and in NaNO₃ solutions” [29], analiza la tribocorrosión en aleaciones de aluminio con silicio, cobre y magnesio en soluciones de cloruro de sodio y nitrato de sodio.

En muchas aplicaciones, las aleaciones de metal están expuestas a tribocorrosión, como cojinetes o bloques de motor. Se conoce como tribocorrosión al efecto conjunto de desgaste por fricción, y corrosión en la pieza. En elementos en los que existe fricción, se produce inevitablemente cierto desgaste. La corrosión puede acelerar el desgaste de las piezas, y el desgaste de las piezas puede acelerar la corrosión. A esto hay que sumarle el efecto de la erosión, que puede producirse debido a impurezas entre las superficies en contacto. La principal protección contra la corrosión en los metales es la formación de una película pasivante, que actúa de barrera entre el metal y el entorno. Cuando esta capa está expuesta a fricción, se daña la capa pasivante del metal, y de esta forma, se agrava la corrosión.

El estudio compara distintas aleaciones de aluminio, para intentar conocer los mecanismos de tribocorrosión e intentar esbozar un modelo. De esta forma, establece que, en general, la principal causa de degradación de las piezas es el desgaste mecánico. Además, el desgaste en soluciones de cloruro de sodio es menor que el que se produce en nitrato de sodio. Sin embargo, el estudio no logra concluir un modelo que pueda predecir los resultados experimentales.

Por último, en 2012, “Design of compact controller and power module for corrosion and marine growth prevention” [30], diseña un dispositivo electrónico para prevenir la corrosión en barcos en ambientes marinos.

El dispositivo monitorea constantemente el potencial eléctrico del casco del buque, para así modificar la corriente eléctrica que lo protege con ánodos externos.

4.9.1 Modelos matemáticos

La corrosión de acero en ambientes de atmósfera marina tiene un gran interés económico por su implicación estructural: la pérdida de sección puede tener un impacto muy significativo en la seguridad.

Igualmente, las picaduras en tanques, tuberías y contenedores, pueden tener repercusiones graves debido a la perforación de las paredes.

En el intento de mantener la estructura existente en servicio durante periodos de tiempo cada vez más largos, para así diferir los costos de reemplazo de las piezas, es muy interesante predecir el tiempo durante el cual los revestimientos y otras protecciones son eficaces contra la corrosión; y, una vez que se pierde dicha protección, conocer la pérdida por corrosión que se produce, para optimizar de esta forma el coste de mantenimiento.

Robert Melchers, en Australia, plantea un modelo para evaluar la velocidad de corrosión en el medio marino. En general, se acepta que la corrosión es lineal en el tiempo; o que la velocidad de corrosión es una función monótona decreciente en el tiempo. Sin embargo, para Melchers, esto es un error, ya que considera que la corrosión no es lineal en el tiempo.

Asimismo, también considera que la corrosión no se puede simplificar al estudio de un fenómeno electroquímico simple, debido a la presencia de bacterias reductoras de sulfatos en el medio marino, y por ello, estima que las pruebas de laboratorio sobre corrosión no pueden replicar a las pruebas que se hacen en condiciones naturales, ya que no pueden imitar dichos procesos bacteriológicos.

Por ello, su modelo tiene en cuenta la profundidad de la inmersión del acero, la salinidad del agua, la velocidad del agua, la composición del acero, los niveles de oxígeno y la contaminación del agua. Debido a que algunas de estas variables son fenómenos naturales, propone un modelo probabilístico.

El modelo es válido tanto para evaluar la velocidad de corrosión como para evaluar la velocidad de crecimiento de las picaduras por corrosión. A lo largo de los años, analiza la validez de su modelo para diversas situaciones, y plantea algunas correcciones.

En 1999, “Corrosion uncertainty modelling for steel structures” [31], esboza su modelo, y plantea que considerar la pérdida por corrosión como una ley lineal no es una hipótesis válida. Además, identifica a las bacterias reductoras de sulfatos como responsables de la corrosión a largo plazo.

En 2003 “Mathematical modelling of the diffusion controlled phase in marine immersion corrosion of mild steel” [32], ajusta el modelo según datos de diversos ensayos. En el mismo año “Modeling of marine immersion corrosion for mild and low-alloy steels-part 1: phenomenological model” [33], continúa el ajuste del modelo, y establece que el factor de mayor importancia en el comportamiento de la corrosión es la temperatura del agua marina, en consonancia con el ritmo bacteriológico.

Al año siguiente, 2004, junto con R. Jeffrey, “Surface ‘Roughness’ Effect on Marine Immersion Corrosion of Mild Steel” [34], estudia las diferencias en la corrosión según el acabado de la superficie del acero, concluyendo que, a partir de los tres meses, no hay diferencias en la velocidad de corrosión en aceros lisos o rugosos. Además, propone que la mayor velocidad inicial de corrosión de los aceros rugosos se debe a la mayor superficie específica.

En 2005, de nuevo con R. Jeffrey, “Early corrosion of mild steel in seawater” [35], establece que la corrosión a corto plazo se debe principalmente a la concentración de oxígeno disuelto en el agua.

En 2006, expone su modelo en el coloquio [36] “Advances in mathematical probabilistic modelling of the atmospheric corrosion of structural steels in ocean environments”.

En 2008 “A new interpretation of the corrosion loss processes for weathering steels in marine atmospheres” [37], estudia la aplicación del modelo para aceros corten.

También en 2008, en colaboración con M.T. Gudze, publica “Operational based corrosion analysis in naval ships” [38], donde estudia la aplicación de su modelo en tanques de barcos; donde, en general, no es efectiva la pintura ni los ánodos de sacrificio como protección. En este caso, la corrosión se produce tanto en inmersión como de forma atmosférica, debido a los ciclos de llenado y vaciado de los tanques.

En 2007 “The effects of water pollution on the immersion corrosion of mild and low alloy steels” [39], estudia la aplicación del modelo en agua dulce, y los efectos de la contaminación del agua en la corrosión, y deduce que debido a que la corrosión a largo plazo se debe al efecto de bacterias anóxicas, la tasa de corrosión depende de la cantidad de nutrientes almacenados en la capa de óxido durante la corrosión inicial. Además, el nivel de contaminación del medio influye en la velocidad de corrosión.

Por último, en 2010, junto con B. B. Chernov, “Corrosion loss of mild steel in high temperature hard freshwater” [40], estudia la aplicación del modelo en agua dulce con altas temperaturas.

Por otra parte, Guedes Soares, en colaboración con otros autores, desarrollan un modelo de degradación del acero no lineal, que publican como “Corrosion wastage model for ship crude oil tanks” [41], en 2008, y “Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere” [42] en 2009.

En este modelo, estudian la velocidad de corrosión en tanques de petróleo, y el efecto del dióxido de carbono, la temperatura, la humedad relativa y la concentración de sulfuros.

El modelo supone que la corrosión a corto plazo ocurre en un ambiente estacionario, y la corrosión a largo plazo se plantea como la sucesión de diferentes estados estacionarios.

Los autores concluyen que, para la atmósfera del océano Pacífico, el factor que más influye en la corrosión es la humedad relativa.

Otros autores también han propuesto modelos matemáticos para evaluar la corrosión, en 2004 se publican “A time-dependent corrosion wastage model

for seawater ballast tank structures of ships” [43], y “Predicting localized corrosion in seawater” [44].

El primero propone un modelo estadístico tipo Weibull para predecir la corrosión de los tanques de agua en buques en función del tiempo.

El segundo artículo plantea un modelo empírico para calcular el potencial de repasivación de aleaciones, en función de las concentraciones de oxígeno y cloro presente en el agua de mar, y de la temperatura.

4.9.2 Corrosión en armaduras de hormigón

Aunque el hormigón no es un material que se utilice normalmente en buques, se hará igualmente una breve reseña de los mecanismos por los cuales se corroe este material, para que este breve sumario sobre la corrosión no quede incompleto.

La corrosión del acero de las armaduras es uno de los principales problemas estructurales del hormigón, ya que es uno de los daños más frecuentes y que ocasionan mayores deterioros en las estructuras. Se manifiesta por el desprendimiento del hormigón, de forma puntual o longitudinal, y dejando las armaduras próximas a la superficie sin protección. Debido a la expansión del acero asociada a la corrosión, se originan fuerzas de tracción, que agrietan el hormigón hasta el punto de provocar su desprendimiento. Con el tiempo, las armaduras quedan recubiertas por una película de óxido que se manifiesta mediante la aparición de manchas en la zona afectada.

Durante la hidratación del cemento se libera hidróxido cálcico, también llamado portlandita, que otorga carácter básico al hormigón, otorgando al hormigón un pH ácido. Con estos valores de pH el acero de las armaduras se encuentra pasivado, es decir, recubierto con una capa de óxidos, compacta y continua, que lo mantiene protegido de la corrosión. Si bien existen varias causas que pueden dar lugar a la destrucción de la capa pasivante del acero, en la práctica los factores que promueven la corrosión electroquímica de las armaduras en el interior del hormigón son mayoritariamente la carbonatación y la presencia de cloruros, o ambos factores en conjunto.

La corrosión por iones cloruro, se produce cuando estos iones consiguen penetrar en el hormigón hasta alcanzar la superficie de la armadura. La corrosión por carbonatación se debe a la reacción del hidróxido de calcio con el dióxido de carbono, que forma carbonato cálcico insoluble, que sólo puede ocurrir en presencia de agua. La carbonatación conlleva una reducción del pH del hormigón, por lo que la armadura deja de estar protegida.

El fisuramiento y la porosidad del hormigón permite el paso hasta las armaduras de oxígeno, humedad, y de diversos agresores del medio; desarrollándose corrosión. Este tipo de patología, bastante frecuente, pone en peligro la solidez de los elementos afectados y necesita a menudo reparaciones costosas, ya que, a consecuencia de la corrosión, se reduce la sección resistente del acero.

Tanto como prevención contra la corrosión, se emplean varios métodos, principalmente, el uso de hormigón de alta calidad, y una cobertura adecuada. Cuando las condiciones ambientales son severas, se emplean otros métodos a mayores, como el uso de selladores, o aditivos, tales como microsílíce y nitrito de calcio. Los selladores no siempre tienen éxito, debido a su incapacidad para proteger el hormigón cuando se produce agrietamiento después del tratamiento. Además, algunos selladores comerciales pueden aumentar la cantidad de absorción de agua después de la aplicación, haciendo de esta forma más fácil la penetración de los iones cloruro.

Como protección ante la corrosión y como reparación, también se emplean inhibidores por migración, que se aplican sobre el hormigón ya endurecido.

En 1998, "A time-release technique for corrosion prevention" [45], se propone y diseña un sistema anticorrosión de aplicación in situ para las armaduras del hormigón, mediante el uso de nitrito de calcio.

El nitrito de calcio es un inhibidor de la corrosión. Este sistema usa fibras huecas de polipropileno rellenas de nitrito de calcio, que se colocan al lado de la armadura, con un recubrimiento para liberar el inhibidor poco a poco.

Uno de los recubrimientos propuestos, basado en poliol, un alcohol polihídrico, se descompone en presencia de iones cloruro, por lo que en el momento que podría comenzar la corrosión, se libera el inhibidor. El otro recubrimiento estudiado es parafina. Para liberar el inhibidor, es necesario calentar la barra para fundir la cera, para lo que es necesaria una fuente exterior.

Con la liberación de nitrito de calcio, la corrosión ocurre más tarde, y con menor intensidad. Con este método se alarga la vida del acero, y, por lo tanto, de toda la estructura.

En 2002, "Prevention of steel corrosion in concrete exposed to seawater with submerged sacrificial anodes" [46], estudia la eficacia de usar ánodos de sacrificio sumergidos como prevención catódica para las armaduras en las partes emergidas de las estructuras marinas.

En las estructuras marinas, en las zonas sumergidas no suele producirse corrosión, debido a la falta de oxígeno. Sin embargo, en la zona de marea y de salpicadura, la corrosión es grave. Además, la zona de corrosión depende de las características del mar, ya que, en zonas de mar calmado, la corrosión se produce en una zona más localizada que en los mares agitados.

Por encima de la zona de inmersión, el uso de ánodos de sacrificio tiene poca eficacia. Por ello, se aplica una corriente catódica en la armadura, que retrasa el inicio de la aparición de picaduras, es decir, sería una forma de prevención catódica y no de protección catódica.

En este trabajo se estudia la posibilidad de aplicar de los ánodos de sacrificio sumergidos para contrastar la iniciación a la corrosión en la parte emergida de pilotes marinos, y se discute los resultados de la investigación de laboratorio orientados a conocer la altura sobre el nivel del mar a la que se puede lograr esta prevención.

Los resultados sugieren que el uso de ánodos de sacrificio sumergidos puede ser un medio económico y eficaz para evitar daños por corrosión en la parte emergente de las estructuras marinas, al menos con mar en calma.

Los mismos autores publican en 2009 “Effects of cathodic prevention on the chloride threshold for steel corrosion in concrete” [47], analizando la prevención catódica de las armaduras.

El método se basa en aplicar una corriente eléctrica catódica de muy baja intensidad, para mantener así la armadura en condiciones pasivas. Por otra parte, la reacción catódica del acero evita la disminución del pH, mejorando así el comportamiento ante la corrosión por cloruros. Además, al ser una corriente eléctrica de baja intensidad, se puede aplicar sin riesgo de fragilización por hidrógeno en pre- tensados. En general, la aplicación de esta corriente eléctrica aumenta el umbral de concentración de iones cloruros necesarios para que se inicie la corrosión.

En 2006, “Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures” [48], analiza la eficacia de los diferentes inhibidores comerciales orgánicos en la corrosión por cloruros en las armaduras.

Después de analizar la corrosión producida en tres años en barras de armadura, se concluye que, en general, todos los inhibidores orgánicos son capaces de reducir la tasa de penetración de los cloruros en el hormigón, rellenando los poros del hormigón, y retrasando así la aparición de corrosión. Sin embargo, una vez que se produce, los inhibidores no consiguen disminuir la tasa de corrosión.

Por último, el estudio de 2010 “Environmental factors affecting the corrosion behavior of reinforcing steel. IV. Variation in the pitting corrosion current in relation to the concentration of the aggressive and the inhibitive anion” [49], caracteriza la corrosión y los productos de corrosión de las armaduras, en función de la concentración de diversos iones e inhibidores.

4.9.3 Corrosión en otros medios

En 1996, se publica “Pitting Corrosion of copper” [50], que describe un modelo matemático para la propagación de las picaduras de corrosión en el cobre. El motivo de este estudio es analizar la corrosión a largo plazo de los recipientes de cobre para residuos nucleares.

El modelo se utiliza para predecir el potencial por debajo del cual el cobre es inmune a la corrosión por picaduras. Se calcula una estimación la tasa de crecimiento según los potenciales para los cuales el cobre no es inmune a la picadura.

El estudio concluye que el aumento de la temperatura hace menos probable la generación de picaduras; y que la presencia de altas concentraciones de cloruro aumenta la probabilidad de picaduras.

Por otra parte, en los sistemas de calefacción, la concentración de oxígeno disminuye a partir del primer uso, ya que, al calentar el agua del circuito, se produce la descomposición del aire presente en el agua, el cual se evacua con las válvulas de purga del radiador. Por lo tanto, sólo se produce corrosión a corto plazo si en el sistema no hay reposición de agua en el circuito. Sin embargo, debido a errores de diseño, hay mecanismos por los cuales el agua puede captar oxígeno de nuevo, a través del tanque de expansión. Para evitarlo, se diseñan tanques de expansión sellados.

En los casos en los que el agua está saturada de oxígeno, el acero dulce se corroe rápidamente. La tasa de corrosión depende de la reacción de reducción del oxígeno, y aumenta de forma exponencial con la temperatura del agua. Sin embargo, es necesario diferenciar los casos de circuitos presurizados o sin presurizar.

Los principales mecanismos de corrosión en estos casos son la corrosión galvánica y la corrosión por picadura. La corrosión galvánica se produce al mezclar radiadores de acero con tuberías de cobre. En estos casos, el acero actúa como un ánodo de sacrificio del cobre, y la velocidad de corrosión depende de la conductividad iónica del agua. La corrosión por picadura se debe a que las zonas de acero que están en contacto con agua en movimiento están expuestas a mayor contenido en oxígeno y actúan de forma catódica.

En general, estos problemas pueden evitarse mediante el uso de inhibidores de la corrosión disueltos en el agua del circuito de calefacción.

En 1997, se publica "Corrosion of central heating systems" [51], en el que se resumen los principales mecanismos de corrosión en sistemas de calefacción

central y describe los factores que aumentan la corrosión, centrándose en el estudio de la corrosión en radiadores y tuberías de acero dulce, y en intercambiadores de aluminio, en varios casos reales.

El primer caso de estudio es la corrosión rápida en radiadores de acero. En este caso, después de veinte años de uso, se decidió sustituir los radiadores de una instalación en un bloque de oficinas. Sin embargo, se decidió no limpiar las tuberías existentes con algún agente anticorrosivo. Debido al poco espesor de los nuevos radiadores, se añadió un inhibidor de la corrosión al agua, una solución de nitrito de sodio y borato de sodio. La concentración de estos inhibidores se controló cada dos meses, para mantenerla por encima del nivel necesario. A pesar de ello, a los dos años, los radiadores comenzaron a tener fugas.

El análisis del agua indicó altas concentraciones en iones de cloro y de sulfatos. Debido a estas altas concentraciones, se estima que la concentración de inhibidor calculada no era suficiente. Además, se presume que en el agua también hay bacterias oxidantes del nitrógeno del inhibidor, ya que la concentración del inhibidor disminuye rápidamente. Esto se habría evitado con el uso de un biocida durante el primer llenado del sistema.

En el segundo caso de estudio, se analizan la presencia de agujeros en intercambiadores de calor de aluminio. Un intercambiador de calor en un sistema de calefacción consiste en cierto número de tubos de aluminio dispuestos concéntricamente a un quemador de gas. A pesar del uso de inhibidores en el agua, se producen varios fallos en estos intercambiadores. De nuevo, la corrosión aparece por un mal cálculo de la concentración del inhibidor, con el agravante de que con el flujo de calor y la temperatura la velocidad de corrosión aumenta.

En el tercer caso, se estudia la corrosión externa en tuberías de acero. En una gran instalación de calefacción, con las tuberías dentro del hormigón de la estructura, se producen fugas en las tuberías a partir de los quince años de su construcción. Al extraer las tuberías, se observa que la corrosión que provoca las fugas es en el exterior de la tubería. El estudio concluye que la corrosión se debe al agua de lluvia filtrada en la estructura. En el agua de lluvia, la saturación

de oxígeno y de dióxido de carbono es elevada, lo que hace aumentar la tasa de corrosión.

En 2000, “Combination effect of fretting and corrosion on bolt-type power connectors” [52], de Guo-Ping Luo, estudia las causas de la pérdida de la fuerza de conexión en los tornillos en conectores eléctricos tipo ‘bolt’, lo que provoca una gran pérdida de rendimiento en la conexión afectada.

Para ello, se analizan varios conectores que han fallado en líneas de distribución, en diferentes regiones de China. Mediante diferentes técnicas, como son el microscopio electrónico de barrido o la fluorescencia de rayos X, se observa la morfología de la superficie; y mediante espectroscopia de fotoelectrones se analizan los componentes de los productos de corrosión.

Con estas técnicas se observa que se produce corrosión de distintos tipos: existe corrosión electroquímica entre el conector de aluminio y la arandela de acero del tornillo. La capa de pasivación se fisura debido a la gran fuerza compresiva del tornillo, y con la presencia de humedad, el conector de aluminio se convierte en un ánodo y la arandela de acero en un cátodo. También se produce corrosión por fisuración entre la arandela plana y la arandela de seguridad, y además, corrosión por estrés entre la arandela de seguridad y el conector de aluminio.

La corrosión provoca que aumente la resistencia eléctrica de la corrosión, lo que hace incrementar la temperatura del conector, agravando así la corrosión. La corrosión reduce la fuerza de contacto, y puede provocar la ruptura por estrés del conector.

En 2001, “Corrosion resistance, coating, and magnetic property issues of non-magnetic austenitic stainless steels for ship hulls” [53], compara la resistencia a la corrosión de aceros no magnéticos para su uso en cascos de buques militares y submarinos.

Todos los barcos, especialmente los de casco de acero, tienen la propiedad de alterar el campo magnético terrestre. Cada modelo de barco altera esto de una forma diferente, por lo que esta alteración se le conoce con el nombre de firma magnética. Esta firma magnética es una forma de detección de

buques de guerra y submarinos, que permite a las minas detectar la presencia de un barco y activarse.

Además, durante el proceso de fabricación, el acero del barco adquiere un magnetismo permanente, que permanecerá a lo largo de su vida, y los diferentes materiales ferromagnéticos que constituyen el barco hacen que se adquiera un magnetismo inducido, que variará en función de la intensidad del campo magnético terrestre.

Para evitar la detección de los buques de guerra y submarinos, es necesario reducir la firma magnética. Para ello, es necesario usar metales con baja permeabilidad magnética, y a mayores, emplear bobinas para compensar y neutralizar el magnetismo inducido.

El estudio compara diferentes aceros comerciales no magnéticos, para elegir uno según la resistencia a la corrosión por picaduras y por grietas, en relación a sus propiedades no magnéticas y su coste. También en 2001, “Applicability of the slope parameter method to the design of cathodic protection systems for marine pipelines” [54], se propone una modificación del sistema de protección catódico que se emplea habitualmente en oleoductos. El estudio cuantifica la relación entre la vida de diseño, el tamaño del ánodo, la calidad, el tamaño de la tubería de revestimiento y la magnitud de la polarización. En 2002, “Hot corrosion in gas turbine components” [55], estudia la rotura de turbinas de aeronaves debido a la corrosión.

En las turbinas de gas de aeronaves, se produce simultáneamente una alta presencia de contaminantes, tales como sodio, azufre, vanadio, y diversos haluros; con altas temperaturas; circunstancias que favorecen la corrosión. La corrosión a altas temperaturas se produce sin necesidad de un electrolito en el ambiente, y por ello, la corrosión se produce de forma generalizada en la superficie del metal. Este estudio encuentra dos tipos de corrosión en caliente, según la temperatura que se alcance. Además, se establece que la rotura de las turbinas se produce por la combinación de corrosión por fatiga y corrosión a altas temperaturas.

En 2006, “Effects of potassium sulfide content in marine diesel fuel oil on emission characteristics of marine furnaces under varying humidity of inlet air”

[56], de Cherng-Yuan Lin and Wei-Cheng Chen, estudia la adición de sulfuros de potasio en el combustible diésel en ambientes marinos, y sus efectos en las emisiones, en función de diferentes niveles de humedad relativa en el aire de entrada.

Una de las formas de generación de energía es mediante instalaciones de combustión, que se suelen situar en zonas costeras, por diversos motivos como son la facilidad de acceso a agua de refrigeración o por las regulaciones de contaminación ambiental. Estas ubicaciones hacen que los procesos de combustión y sus emisiones estén afectados por el ambiente húmedo y la presencia de impurezas en suspensión en el aire.

Estos gases de emisión pueden degradar el ambiente atmosférico y ser un riesgo para la salud humana. Además, en estas instalaciones, por motivos económicos, se suelen usar combustibles diésel baratos y degradados. Estos combustibles diésel degradados suelen contener distintos óxidos o sulfuros de componentes metálicos, que en su combustión provocan el deterioro de la contaminación atmosférica, como son lluvia ácida, destrucción de la capa de ozono, y efecto invernadero. El componente que más influye en la formación de productos de combustión es el sulfuro potásico. Durante la combustión, este sulfuro reacciona con otros óxidos metálicos y forma sulfatos complejos, que tienen un bajo punto de fusión y son altamente corrosivos. Si estas partículas se adhieren a partes metálicas en la instalación de energía, pueden provocar una corrosión acelerada, e incluso modificar la velocidad de combustión del diésel.

Para el estudio, se experimenta con un horno en el que se quema diésel en diversos ambientes con humedad controlada, y, a partir de los resultados obtenidos, se concluye que con la presencia de sulfuro de potasio en el combustible, al aumentar la humedad relativa del aire de entrada, disminuye la temperatura de combustión de los gases del diésel, aumentando la concentración de dióxido de carbono y de óxido de nitrógeno en los productos de la combustión, y mejorando la eficiencia de la combustión.

También en 2006, "Effect of corrosion prevention compounds on fatigue life in 2024-T3 aluminum alloy" [57], se estudia la influencia de la corrosión y el vapor en la fractura por fatiga del aluminio.

En la industria aeronáutica se emplea, como prevención para la corrosión, un aceite, conocido como CPC, que se pulveriza y se fija a la superficie metálica, formando un sello hermético entre la superficie del metal y el ambiente exterior. Sin embargo, esta protección no es del todo eficaz en el caso de la corrosión por fatiga. Por ello, este estudio analiza el mecanismo fractura por fatiga con la presencia de este aceite.

Cuando durante el ciclo de carga y descarga, la carga va aumentando, la resistencia a la fatiga disminuye, sin embargo, el aumento de la frecuencia no parece ser significativo. En presencia de vapor de agua, la fractura pasa de ser dúctil a frágil, debido al efecto lubricante de las caras de la grieta. Cuando se aplica CPC, esta prevención evita en parte la presencia de vapor de agua en la grieta, mejorando así la resistencia del aluminio.

En 2008, “Mejora del comportamiento frente a la tribocorrosión de un acero inoxidable austenítico modificado” [58], se estudia un tratamiento de acero para mejorar el comportamiento a corrosión, desgaste, y tribocorrosión, para su uso en prótesis estructurales del cuerpo humano.

Para ello, se realiza un tratamiento dúplex de nitruración iónica sobre un acero inoxidable austenítico, y se estudia el comportamiento frente a la corrosión, desgaste y tribocorrosión sumergido en una solución fisiológica simulada. Para caracterizar el comportamiento se emplea espectroscopia de emisión electroquímica y espectroscopia de impedancia electroquímica y de técnicas de estudio de desgaste del tipo ‘pin on disk’.

Con este tratamiento para el acero se observa mejora de resistencia frente a la corrosión y desgaste respecto al acero inoxidable austenítico sin tratamiento.

En 2009, “Tribocorrosion of 316L stainless steel and TA6V4 alloy in H₂SO₄ media”, [59], se analizan los resultados de una serie de ensayos sobre desgaste y corrosión, sobre acero y acero en aleación con titanio. Las probetas son sumergidas en una solución de ácido sulfúrico, y se someten a diferentes potenciales electroquímicos.

Los resultados experimentales muestran que el potencial electroquímico afecta en gran medida tanto coeficiente de fricción como a la resistencia al

desgaste de los materiales, ya que hace variar la velocidad de repasivación de la superficie, de forma que aumentar la carga de potencial hace disminuir el coeficiente de fricción.

En 2010, “Modified cassava starches as corrosion inhibitors of carbon steel: An electrochemical and morphological approach” [60], se propone el uso de almidón de yuca modificado como inhibidor de la corrosión.

En los sistemas de refrigeración por agua, la principal causa de degradación es la corrosión, ya sea por la pérdida de material o por el desarrollo de bacterias. Para evitarlo, se usan inhibidores de corrosión y biocidas. Sin embargo, estos inhibidores presentan algunos problemas. Los inhibidores basados en el cromo, nitrógeno y boro, aunque tienen una alta eficiencia, también tienen una alta toxicidad para el ser humano. Otros compuestos, económicamente rentables, tales como cationes metálicos, polifosfatos, gluconatos, vanadatos, molibdatos, fosfonatos, poliacrilatos, y carboxilatos, han sido prohibidos en diversas regulaciones ambientales, debido a su baja biodegradabilidad, que causa eutrofización. Por lo tanto, actualmente se buscan inhibidores no tóxicos para el ser humano, y con bajo impacto medioambiental. El almidón de yuca es un polímero natural, de bajo coste y biodegradable. Sin embargo, el almidón sin tratar es poco soluble en agua y poco estable cuando se emplea en un ambiente con pH bajo.

Se modifica el almidón para obtener almidones pregelatinizados y activados, y se experimenta con dos de estos tipos de almidones modificados, para conocer su eficacia como inhibidor de la corrosión en agua sanitaria, y, se demuestra que el almidón de yuca es un inhibidor de la corrosión, y que su capacidad como inhibidor depende de la concentración.

En el mismo año, Valcarce et al. publican “Phosphate ions used as green inhibitor against copper corrosion in tap water” [61], que estudia la dosis óptima de iones fosfato como inhibidor de la corrosión en tuberías de cobre.

Las tuberías de cobre son muy usadas en los sistemas de distribución de agua potable. Pero en aguas blandas, con valores de pH ligeramente ácidos, puede producirse la liberación de metal, que es perjudicial para la salud de los consumidores. Usualmente, se emplea como inhibidor de la corrosión ortofosfato

de sodio, que no es perjudicial para el ser humano. Se supone que el mecanismo por el cual se inhibe la corrosión, y con ello la liberación del cobre, es la formación de una capa de fosfato de cobre.

El empleo de ortofosfato de sodio tiene cierto impacto ambiental, en los casos en los que se desperdicia agua potable, se puede producir eutrofización en el agua. Por ello, es necesario proponer una dosificación ajustada para su uso como inhibidor de la corrosión en el cobre.

Los mismos autores proponen una dosificación del ortofosfato de sodio, después de comprobar que este inhibidor retrasa la aparición de corrosión y de picaduras por corrosión, sin embargo, una vez que se produce la picadura, el inhibidor no afecta a la velocidad de crecimiento de la picadura.

Valcarce continua con el estudio del uso de fosfatos como inhibidor, “Brass corrosion in tap water distribution systems inhibited by phosphate ions” (2011) [62], en este caso, de la corrosión en el latón.

El latón, aleación de cobre y zinc, también es muy usado en distintos accesorios de sistemas de distribución de agua. En vista del buen resultado del ortofosfato de sodio en tuberías de cobre, Valcarce estudia y propone una dosificación de este inhibidor para el caso del latón. Sin embargo, en el latón, a pesar de la formación de una capa de óxido más denso y más delgado, no existe repasivación, por lo que se agrava la corrosión por picaduras.

“Surface characterization of copper, zinc and brass in contact with tap water inhibited with phosphate ions” (2011) [63], del mismo autor, se propone y comprueba un mecanismo de como el ortofosfato de sodio inhibe la corrosión en el cobre, en el zinc, y la influencia del zinc en la aleación.

También en 2011, “Operation of Marine Diesel Engines on Biogenic Fuels: Modification of Emissions and Resulting Climate Effects” [64], estudia el impacto ambiental de los diferentes combustibles de motores diésel marinos.

Para estos motores, se usan tanto combustibles fósiles como biocombustibles, para de esta forma intentar reducir la huella ecológica de los motores de combustión. Se espera que estos biocombustibles emitan menos contaminantes que los combustibles fósiles, especialmente azufre. El estudio

analiza los productos de combustión de los biocombustibles, y concluye que el aceite de soja y el aceite de palma podrían ser usados para evitar el efecto invernadero.

En 2012, "The impact of aluminium sacrificial anodes on the marine environment: A case study" [65] analiza el posible impacto ambiental de los ánodos de sacrificio de aluminio en el medio marino. En estructuras marinas, es muy habitual el uso de ánodos de sacrificio como protección catódica ante la corrosión. Con esta técnica, el ánodo se va disolviendo progresivamente, de forma que el metal se libera en el medio acuático, que pueden tener efectos medioambientales perjudiciales. Los productos de la corrosión del aluminio pueden unirse a la superficie de algunos materiales, como son arcillas, o algunos compuestos orgánicos. Aunque el aluminio no se considera un metal tóxico, no está claro su impacto ambiental. Por ello, se analizan los sedimentos portuarios y del agua en el entorno del puerto francés de Le Havre.

Los resultados señalan que este tipo de protección, aunque no afecta al contenido en aluminio del agua, aumenta la concentración de aluminio en los sedimentos. Por ello, se propone un estudio sobre la bioacumulación de estos productos de corrosión del aluminio y su toxicidad en el entorno.

También en 2012, se publica "Impact of advanced water conservation features and new copper pipe on rapid chloramine decay and microbial regrowth" [66], un estudio sobre problemas de mal olor y sabor en el agua potable de edificios nuevos.

Los sistemas de ahorro de agua en edificios nuevos, reducen el uso de agua potable. Sin embargo, no se suelen modificar las tuberías, que son dimensionadas para caudales superiores, es decir, las tuberías están sobredimensionadas. Este sobredimensionamiento hace que la tasa de renovación del agua disminuya, lo que causa que la concentración del desinfectante cloramina en el agua estancada en las tuberías decaiga rápidamente. Este efecto se agrava en el caso de que el agua se estanque en tuberías de cobre, ya que la corrosión del cobre favorece la desaparición de la cloramina. De hecho, en contacto con tuberías de cobre, la cloramina desaparece completamente en sólo doce horas. La consecuencia de esta

disminución drástica del desinfectante es la aparición de bacterias, que dan mal sabor al agua.

Para evitar estos problemas, el estudio propone reducir los diámetros de tuberías, adaptándolos a las necesidades de los nuevos caudales. Además, se sugiere que los inhibidores de corrosión basados en fosfatos, al evitar la corrosión del cobre, mejoran la duración del desinfectante.

En el mismo año, “Development of a Predictive CFD Fouling Model for Diesel Engine Exhaust Gas Systems” [67], propone una simulación numérica para el estudio de la deposición de las partículas de hollín en el escape de los motores diésel marinos.

Debido al endurecimiento de las normas anticontaminación para las emisiones de motores diésel, es muy interesante tener modelos de predicción de la profundidad de la capa de suciedad.

Uno de los factores más influyentes en la contaminación de los sistemas de escape, es la deposición de material sobre su superficie. La deposición de material disminuye la eficiencia térmica, y además, esta capa implica una reducción significativa de la sección transversal, que provoca un aumento en la presión del gas de escape.

El estudio desarrolla un modelo semiempírico que tiene en cuenta los efectos de los diferentes procesos de deposición, como son la termoféresis, la sedimentación por gravedad, las fuerzas electroestáticas o el movimiento browniano.

4.10 Bibliografía

- [1] R Gundersen and K Nisancioglu. Cathodic protection of aluminum in seawater. *Corrosion*, 46(4):279–285, 1990.
- [2] VS Voruganti, HB Luft, D DeGeer, and SA Bradford. Scanning reference electrode technique for the investigation of preferential corrosion of weldments in offshore applications. *Corrosion*, 47(5):343–351, 1991.
- [3] DR Lenard and JG Moores. Initiation of crevice corrosion by stray current on stainless steel propeller shafts. *Corrosion*, 49(9):769–775, 1993.
- [4] E. Heitz. Mechanistically based prevention strategies of flow-induced corrosion. *Electrochimica Acta*, 41(4):503 – 509, 1996.
- [5] X.-H. Wang, J. Li, J.-Y. Zhang, Z.-C. Sun, L. Yu, X.-B. Jing, F.-S. Wang, Z.-X. Sun, and Z.-J. Ye. Polyaniline as marine antifouling and corrosion-prevention agent. *Synthetic Metals*, 102(1–3):1377 – 1380, 1999.
- [6] K Habib and K Al-Muhana. Detection of crevice corrosion of steels in seawater by optical interferometry. *Materials Characterization*, 45(3):203 – 209, 2000.
- [7] Francisco Miguel Díaz Rodríguez. Estudio de la corrosión atmosférica del zinc y el acero galvanizado. PhD thesis, Universidad de La Laguna, 2001.
- [8] C.M. Branco, V. Infante, A. Sousa e Brito, and R.F. Martins. A failure analysis study of wet liners in maritime diesel engines. *Engineering Failure Analysis*, 9(4):403 – 421, 2002.
- [9] Renato Altobelli Antunes, Isolda Costa, and Dalva Lúcia Araújo de Faria. Characterization of corrosion products formed on steels in the first months of atmospheric exposure. *Materials Research*, 6(3):403–408, 2003.
- [10] Q.C Zhang, J.S Wu, J.J Wang, W.L Zheng, J.G Chen, and A.B Li. Corrosion behavior of weathering steel in marine atmosphere. *Materials Chemistry and Physics*, 77(2):603 – 608, 2003.
- [11] Desmond C. Cook. Application of Mössbauer Spectroscopy to the Study of Corrosion. *Hyperfine Interactions*, 153(1-4):61 – 82, 2004.

- [12] Belén Chico González. Corrosión en uniones solapadas de aceros recubiertos. PhD thesis, Universidad Complutense de Madrid, Servicio de Publicaciones, 2004.
- [13] Jason S Lee, Richard I Ray, Brenda J Little, and Edward J Lemieux. Evaluation of deoxygenation as a corrosion control measure for ballast tanks. *Corrosion*, 61(12):1173–1188, 2005.
- [14] T. Kamimura, S. Hara, H. Miyuki, M. Yamashita, and H. Uchida. Composition and protective ability of rust layer formed on weathering steel exposed to various environments. *Corrosion Science*, 48(9):2799 – 2812, 2006.
- [15] Yuri C. Sica, Elaine D. Kenny, Kleber F. Portella, and Djalma F. Campos Filho. Atmospheric corrosion performance of carbon steel, galvanized steel, aluminium and copper in the north brazilian coast. *J. Braz. Chem. Soc.*, 18(1):153–166, 2007.
- [16] Wei Han, Guocai Yu, Zhenyao Wang, and Jun Wang. Characterisation of initial atmospheric corrosion carbon steels by field exposure and laboratory simulation. *Corrosion Science*, 49(7):2920 – 2935, 2007.
- [17] Ana Emilse Coy Echeverría. Evaluación de la modificación de elementos aleantes (Mo, Mn, Ti) en el comportamiento frente a la corrosión de aceros inoxidables austeníticos. 2007.
- [18] Y Li. Mossbauer effect of rust layer formed on steel in different marine corrosion zones. *Corrosion*, 63(9):850–856, 2007.
- [19] Trine Okstad, Øyvind Rannestad, Roy Johnsen, and Kemal Nisancioglu. Significance of hydrogen evolution during cathodic protection of carbon steel in seawater. *Corrosion*, 63(9):857–865, 2007.
- [20] Shuichi Hara, Takayuki Kamimura, Hideaki Miyuki, and Masato Yamashita. Taxonomy for protective ability of rust layer using its composition formed on weathering steel bridge. *Corrosion Science*, 49(3):1131 – 1142, 2007.

- [21] S Taketomi, AT Yokobori Jr, K Takeji, Y Wada, Y Tanaka, and T Iwadate. Corrosion fatigue crack growth rate for petroleum refining pressure vessel materials (2.25 cr-1mo steel). *Corrosion*, 64(9):744–750, 2008.
- [22] F. Corvo, T. Perez, L.R. Dzib, Y. Martin, A. Castañeda, E. Gonzalez, and J. Perez. Outdoor–indoor corrosion of metals in tropical coastal atmospheres. *Corrosion Science*, 50(1):220 – 230, 2008.
- [23] Hiroki Tamura. The role of rusts in corrosion and corrosion protection of iron and steel. *Corrosion Science*, 50(7):1872 – 1883, 2008.
- [24] E. Aragon, J. Woillez, C. Perice, F. Tabaries, and M. Sitz. Corrosion resistant material selection for the manufacturing of marine diesel exhausts scrubbers. *Materials and Design*, 30(5):1548 – 1555, 2009.
- [25] P.F. Gostin, A. Gebert, and L. Schultz. Comparison of the corrosion of bulk amorphous steel with conventional steel. *Corrosion Science*, 52(1):273 – 281, 2010.
- [26] D. de la Fuente, I. Díaz, J. Simancas, B. Chico, and M. Morcillo. Long-term atmospheric corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, 53(2):604 – 617, 2011.
- [27] Josefina Iglesias Juan A. Jaen and Cecilio Hernandez. Analysis of short term steel corrosion products formed in tropical marine environments of Panama. *International Journal of Corrosion*, 2012:162729, 2012.
- [28] L.L. Machuca, S.I. Bailey, and R. Gubner. Systematic study of the corrosion properties of selected high-resistance alloys in natural seawater. *Corrosion Science*, 64(0):8 – 16, 2012.
- [29] A.C. Vieira, L.A. Rocha, N. Papageorgiou, and S. Mischler. Mechanical and electrochemical deterioration mechanisms in the tribocorrosion of Al alloys in NaCl and in NaNO₃ solutions. *Corrosion Science*, 54(0):26 – 35, 2012.
- [30] T Manasa Gangothri, PK Sumitha, SA Moorthy, K Selvajothi, and Mahammed. Design of compact controller and power module for corrosion and marine growth prevention. *Industrial and Information Systems (ICIIS)*, 2012 7th IEEE International Conference on, pages 1–6, 2012.

- [31] Robert E. Melchers. Corrosion uncertainty modelling for steel structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 52(1):3 – 19, 1999.
- [32] R.E. Melchers. Mathematical modelling of the diffusion controlled phase in marine immersion corrosion of mild steel. *Corrosion Science*, 45(5):923 – 940, 2003.
- [33] RE Melchers. Modeling of marine immersion corrosion for mild and low-alloy steels-part 1: phenomenological model. *Corrosion*, 59(4):319–334, 2003.
- [34] RE Melchers and R Jeffrey. Surface “roughness” effect on marine immersion corrosion of mild steel. *Corrosion*, 60(7):697–703, 2004.
- [35] Robert E. Melchers and Robert Jeffrey. Early corrosion of mild steel in seawater. *Corrosion Science*, 47(7):1678 – 1693, 2005.
- [36] R.E. Melchers. Advances in mathematical probabilistic modelling of the atmospheric corrosion of structural steels in ocean environments. III Colloquio Internacional ASRANet (10-12 julio de 2006) Glasgow UK, 2006. Probabilistic Modelling of Structural Degradation.
- [37] R.E. Melchers. A new interpretation of the corrosion loss processes for weathering steels in marine atmospheres. *Corrosion Science*, 50(12):3446 – 3454, 2008.
- [38] M.T. Gudze and R.E. Melchers. Operational based corrosion analysis in naval ships. *Corrosion Science*, 50(12):3296 – 3307, 2008.
- [39] R.E. Melchers. The effects of water pollution on the immersion corrosion of mild and low alloy steels. *Corrosion Science*, 49(8):3149 – 3167, 2007.
- [40] Robert E. Melchers and Boris B. Chernov. Corrosion loss of mild steel in high temperature hard freshwater. *Corrosion Science*, 52(2):449 – 454, 2010.
- [41] C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed, and G. Wang. Corrosion wastage model for ship crude oil tanks. *Corrosion Science*, 50(11):3095 – 3106, 2008.

- [42] C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed, and G. Wang. Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere. *Corrosion Science*, 51(9):2014 – 2026, 2009.
- [43] Jeom Kee Paik, Anil K. Thayamballi, Young Il Park, and Joon Sung Hwang. A time-dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships. *Corrosion Science*, 46(2):471 – 486, 2004.
- [44] N Sridhar, CS Brossia, DS Dunn, and A Anderko. Predicting localized corrosion in seawater. *Corrosion*, 60(10):915–936, 2004.
- [45] C.M. Dry and M.J.T. Corsaw. A time-release technique for corrosion prevention. *Cement and Concrete Research*, 28(8):1133 – 1140, 1998.
- [46] Luca Bertolini, Matteo Gastaldi, MariaPia Pedferri, and Elena Redaelli. Prevention of steel corrosion in concrete exposed to seawater with submerged sacrificial anodes. *Corrosion Science*, 44(7):1497 – 1513, 2002.
- [47] L. Bertolini, F. Bolzoni, M. Gastaldi, T. Pastore, P. Pedferri, and E. Redaelli. Effects of cathodic prevention on the chloride threshold for steel corrosion in concrete. *Electrochimica Acta*, 54(5):1452 – 1463, 2009.
- [48] M. Ormellese, M. Berra, F. Bolzoni, and T. Pastore. Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 36(3):536 – 547, 2006.
- [49] S.M. Abd El Haleem, S. Abd El Wanees, E.E. Abd El Aal, and A. Diab. Environmental factors affecting the corrosion behavior of reinforcing steel. iv. variation in the pitting corrosion current in relation to the concentration of the aggressive and the inhibitive anions. *Corrosion Science*, 52(5):1675 – 1683, 2010.
- [50] Claes Taxén. Pitting corrosion of copper. An equilibrium-mass transport study, KI Rapport, 1996.
- [51] D.R.H. Jones. Corrosion of central heating systems. *Engineering Failure Analysis*, 4(3):179 – 194, 1997.
- [52] Guo-Ping Luo, Liang-Jun Xu, and Ji-Gao Zhang. Combination effect of fretting and corrosion on bolttype power connectors. pages 60–66, 2000.

- [53] AJ Sedriks and PJ Dudt. Corrosion resistance, coating, and magnetic property issues of nonmagnetic austenitic stainless steels for ship hulls. *Corrosion*, 57(1):84–91, 2001.
- [54] K. Bethune and W. H. Hartt. Applicability of the slope parameter method to the design of cathodic protection systems for marine pipelines. *Corrosion Science*, 57(1):78 – 83, 2001.
- [55] N. Eliaz, G. Shemesh, and R.M. Latanision. Hot corrosion in gas turbine components. *Engineering Failure Analysis*, 9(1):31 – 43, 2002.
- [56] Cherng-Yuan Lin and Wei-Cheng Chen. Effects of potassium sulfide content in marine diesel fuel oil on emission characteristics of marine furnaces under varying humidity of inlet air. *Ocean Engineering*, 33(8–9):1260 – 1270, 2006.
- [57] M.A. Wahab, J.H. Park, M.S. Alam, and S.S. Pang. Effect of corrosion prevention compounds on fatigue life in 2024-t3 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 174(1–3):211 – 217, 2006.
- [58] A. de Frutos, M. A. Arenas, R. J. Rodriguez, G. G. Fuentes, J. Yagüe, F. Montalá, N. Martí, and J. De Damborenea. Mejora del comportamiento frente a la tribocorrosión de un acero inoxidable austenítico modificado superficialmente mediante tratamiento dúplex. X Congreso Nacional de Materiales (18-20 junio 2008) Donostia - San Sebastián, 2008.
- [59] P. Henry, J. Takadoum, and P. Bercot. Tribocorrosion of 316l stainless steel and ta6v4 alloy in h2so4 media. *Corrosion Science*, 51(6):1308 – 1314, 2009.
- [60] M. Bello, N. Ochoa, V. Balsamo, F. López-Carrasquero, S. Coll, A. Monsalve, and G. González. Modified cassava starches as corrosion inhibitors of carbon steel: An electrochemical and morphological approach. *Carbohydrate Polymers*, 82(3):561 – 568, 2010.
- [61] M.B. Valcarce and M. Vázquez. Phosphate ions used as green inhibitor against copper corrosion in tap water. *Corrosion Science*, 52(4):1413 – 1420, 2010.

- [62] L. Yohai, M. Vázquez, and M.B. Valcarce. Brass corrosion in tap water distribution systems inhibited by phosphate ions. *Corrosion Science*, 53(3):1130 – 1136, 2011.
- [63] L. Yohai, W.H. Schreiner, M. Vázquez, and M.B. Valcarce. Surface characterization of copper, zinc and brass in contact with tap water inhibited with phosphate ions. *Applied Surface Science*, 257(23):10089 – 10095, 2011.
- [64] Andreas Petzold, Peter Lauer, Uwe Fritsche, Jan Hasselbach, Michael Lichtenstern, Hans Schlager, and Fritz Fleischer. Operation of marine diesel engines on biogenic fuels: Modification of emissions and resulting climate effects. *Environmental science & technology*, 45(24):10394–10400, 2011.
- [65] C. Gabelle, F. Baraud, L. Biree, S. Gouali, H. Hamdoun, C. Rousseau, E. van Veen, and L. Leleyter. The impact of aluminium sacrificial anodes on the marine environment: A case study. *Applied Geochemistry*, 27(10):2088 – 2095, 2012.
- [66] Caroline Nguyen, Carolyn Elfland, and Marc Edwards. Impact of advanced water conservation features and new copper pipe on rapid chloramine decay and microbial regrowth. *Water Research*, 46(3):611 – 621, 2012.
- [67] Concepción Paz, Eduardo Suárez, Antonio Eirís, and Jacobo Porteiro. Development of a predictive cfd fouling model for diesel engine exhaust gas systems. *Heat Transfer Engineering*, (just-accepted), 2012.
- [68] Resumen de “*Corrosión y degradación de materiales*”, Enrique Otero Huerta, ed. Síntesis.

Capítulo 5. Estudio de la corrosión marina en buques

Capítulo 5. Estudio de la corrosión marina en buques.

En este capítulo se estudiarán los casos de corrosión en tanques, cubierta y casco de tres buques. La confidencialidad a la que nos vemos sometidos no nos permite identificarlos. En cualquier caso, sus características vienen referenciadas convenientemente en cada uno de los estudios.

5.1 Introducción

El objetivo de esta parte es examinar el estado de un tanque y a partir de él determinar las posibles acciones de mejora para que estuviese en mejores condiciones durante su funcionamiento.

La corrosión es un problema muy caro, se estima que las pérdidas por corrosión en los Estados Unidos son de unos 275,7 billones al año causando el 90% de las averías [1]. Esto provoca interrupciones en la producción, accidentes y reparaciones. En el caso que nos ocupa, de un barco con corrosión la pérdida de un flete debido a este problema puede ser muy alta, debido a las cláusulas que existen en los contratos de retraso y al problema que resulta tener un barco parado con toda su tripulación.

Los tanques de lastre son las partes más sensibles a la corrosión debido a que están en contacto con el agua del mar cuando se llena, pero siguen estando en un estado rico en cloruros cuando se vacía. Son espacios en donde no es fácil realizar un mantenimiento, cuya luz es deficiente y no tienen buen acceso. Un factor muy importante en la corrosión de estos tanques es la degradación del agua que se almacena, esto es debido a las diferentes condiciones que se puede encontrar el tanque (temperatura, humedad o presión atmosférica). El agua dentro de los tanques suele estar a una temperatura más caliente que en el mar.

Es difícil conseguir un modelo de corrosión al 100% fiable debido a las diferentes condiciones de los tanques como por ejemplo las diferentes protecciones o esquemas de pintura utilizadas y el diferente tipo de agua según dónde se realice el lastrado del buque.

La corrosión aparece en zonas no protegidas o cuya protección no se aplicó adecuadamente. Esta primera aparición de corrosión crece y se desarrolla conforme pasa el tiempo, una de las causas es la cascarilla. Si no se elimina correctamente la cascarilla de laminación durante la construcción del barco puede acelerar el proceso de corrosión. Además, las operaciones de lastrado y deslastrado de los tanques pueden acelerar el proceso de corrosión porque la superficie repetitivamente está seca o húmeda. La corrosión en estos tanques depende de la degradación del recubrimiento anticorrosión.

Otro factor importante es la flexión estructural que sufre la estructura del barco. Este factor favorece la progresión de la corrosión, es la conocida *corrosión bajo tensión*. Se caracteriza por la aparición de grietas que avanzan en la dirección normal a la de aplicación de la tensión a velocidades de propagación.

En los tanques podemos encontrar tres tipos de corrosión.

- a) Pitting: es una corrosión localizada en la parte baja y en superficies horizontales.
- b) Corrosión en ranura: es una corrosión localizada que sucede en intersecciones estructurales donde está depositada el agua. Es parecida al pitting, pero en línea.
- c) Corrosión entre metales soldados: ésta ocurre por la acción galvánica con la base metal. Normalmente ocurre en soldaduras hechas a mano.

Después de la entrega de un buque, ya sea por reparación o por nueva construcción, se debe realizar un plan de inspección y mantenimiento para evitar que la corrosión cuando comience se extienda en el tiempo.

Un factor importante a tener en cuenta dentro de los tanques de los barcos son los gases que se acumulan en las partes altas de los éstos. Esta acumulación de gases dependerá del nivel de carga del tanque, pero siempre existirá una pequeña porción de los mismos dentro de ellos.

Para estudiar la corrosión dentro de los tanques existen tres modelos:

- a) Modelo de corrosión basado en temperatura, deposiciones de sal y tiempo de exposición al líquido [5].
- b) Tratar la corrosión en la parte sumergida del casco [6].
- c) Efectos ambientales dentro de los tanques de carga [7].

5.2 Visión general

Las paradas programadas de los buques son un procedimiento habitual y obligatorio para revisar el estado de los buques. Estas revisiones son muy útiles para prevenir problemas mayores durante las navegaciones de los mismos. Se establece que en Real Decreto 1837/2000 del 10 de noviembre que todos los buques están sometidos a inspecciones programadas para la renovación de sus certificados. [2]

Muchas veces es un problema revisar el estado de los tanques mientras el buque se encuentra en funcionamiento, debido a los plazos, las cargas y los viajes. Es por ello que para inspeccionar los tanques de lastre y de almacenamiento de agua dulce es necesario esperar a la parada programada del buque.

A raíz de esta revisión se encontraron diversos fallos en los tanques a raíz de esto se realizó el informe del Buque A.

5.3 Datos

A continuación, se muestra una tabla resumen de claves para poder entender los cuadros que veremos posteriormente. En este cuadro podremos ver las abreviaturas y números para calificar cada uno de los daños, así como la pintura que se ha utilizado en esa parte en concreto.





| Glosario/abreviaciones usadas | |
|--|--|
| <p>Condición:</p> <p>Blanco: No inspeccionado</p> <p>-: Perfecto</p> <p>1: <2% de superficie dañada</p> <p>2: 2-5% de superficie dañada</p> <p>3: 6-25% de superficie dañada</p> <p>4: >25% de superficie dañada</p> <p>5: 100% de superficie dañada</p> <p>S: Daños dispersos</p> <p>L: Daño localizado</p> | <p>Tipo genérico de pintura:</p> <p>AC: Acrílico</p> <p>A/F: Antifouling</p> <p>ALK: Alquídico</p> <p>CR: Clorocaucho</p> <p>BE: Brea epoxy</p> <p>EPO: Epoxy</p> <p>IZS: Silicato inorgánico zinc</p> <p>PU: Poliuretano</p> <p>PHE: Epoxy Fenólico</p> <p>VIN: Vinílico</p> <p>ZEP: Epoxi rico en zinc</p> |
| <p>Prioridad y urgencia en la reparación</p> <p> Urgente</p> <p> 6 meses</p> <p> 12 meses</p> <p> >12 meses</p> | |

Tabla 5.1. Tabla resumen de abreviaturas usadas para realizar la evaluación del estado de los tanques

Con estas claves (tabla 5.1) se podrá realizar un cuadro resumen para realizar una evaluación del estado y poder elegir la estrategia para adecuada para reparar los daños ocurridos en cada caso.

El buque en cuestión no se puede revelar por cuestiones de confidencialidad. Es un buque dedicado al aprovisionamiento. Su zona habitual de navegación es por el Mar Mediterráneo. Puede transportar tropas y sus vehículos correspondientes. Su desplazamiento en plena carga es de 4560 toneladas.

Este es el cuadro resumen (Tabla 5.2) de todos los tanques analizados de este buque, posteriormente iremos analizando cada uno de los tanques por separado.

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|----------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Pique de proa | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 4L | 1L | - | 1L | - | |
| Tanque sanitario | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 3S | 1L | - | 2L | 3L | |
| Tanque 1A Central | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 3L | 1L | - | 2L | - | |
| Doble fondo N° 1 Br | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 3L | 1L | - | 2L | 4S | |
| Doble fondo N° 1 Er | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2L | 1L | - | 2L | 3S | |
| Tanque n°1 Central | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2L | 1L | - | 1L | 3S | |
| Tanque n°2 Doble fondo Br | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2S | 1S | 2L | 2L | 3S | |
| Tanque n° 1 Profundo ER | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2L | 2L | - | 2L | 3S | |
| Tanque n° 2 Profundo ER | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2L | 2L | - | 2L | 2S | |
| Tanque agua dulce n° 13 BR | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | NA | NA | 2L | 2L | 3S | 4S | 4S | |
| Tanque agua dulce n° 13 ER | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | NA | NA | 2L | 2L | 2L | 4S | 4S | |
| Tanque n° 2 Profundo BR | | | | | | | | |
| Mamparos y techos | EPO | 1763 | 2L | 2L | 1L | 2S | 2L | |
| Pisos | EPO | 1763 | 2L | 2L | 2L | 3S | 5S | |

Tabla 5.2. Resumen de los datos obtenidos durante la inspección.

Como se puede observar (tabla 5.2) todos los tanques revisados necesitan reparación urgente, debido a que tienen corrosiones localizadas en porcentajes altos de su superficie. Los daños más importantes se encuentran en mamparos y techos de todos los tanques, aunque en el tanque n°2 Profundo babor se localizan unos daños del 100% (5S), aunque son daños dispersos, al estar extendidos por toda la superficie dañan la integridad del tanque.

En la Imagen 5.1 se puede observar la estructura de un tanque y sus principales partes. Un tanque es una estructura dentro del barco para almacenar agua, combustible, aceites, carga, etc. Esta estructura se debe adaptar a la forma del barco, dependiendo de su situación tendrá una forma como la que se puede observar en la imagen o podrá ser de otras. La forma del tanque que se describe en la Imagen 5.1 se corresponde con tanques centrales, en los que es más fácil obtener este tipo de forma sin estar condicionada por la forma de la cubierta. Los tanques deberán tener esquinas redondeadas, para evitar sufrir tensiones y consecuentemente roturas en esos puntos, además esta forma facilita la limpieza y evita la acumulación de suciedad.

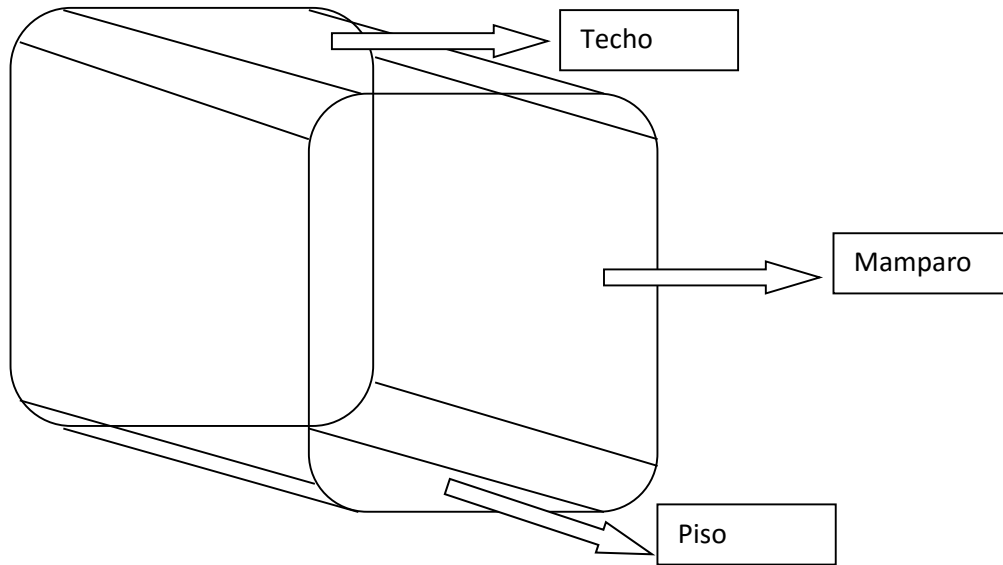


Imagen 5.1. Esquema de un tanque y localización de sus partes

5.4 Análisis de los datos obtenidos

En este punto se describirá el estado de los diferentes tanques del buque A de forma detallada y se describirán los daños y se justificará la recomendación de preparación de superficie para cada caso.

5.4.1 Pique de proa

Resumen de estado:

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|--------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Pique de proa | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 4L | 1L | - | 1L | - | |

Tabla 5.3. Resultados de la inspección del pique de proa.

En este tanque (tabla 5.3) se observa que el recubrimiento utilizado es 1763 de tipo Epoxy y de color claro. Este tipo de pintura está realizada a base de resina, es muy utilizada para protección de superficies debido a que realizan un recubrimiento cuyos resultados a largo plazo son muy satisfactorios debido a su resistencia y dureza. La preparación de la superficie previa a la aplicación de

la pintura epoxy es el condicionante para ayudar a conseguir una mayor durabilidad de la capa protectora y como consecuencia del material a proteger. Esta pintura protectora es la que se usa de forma generalizada para los tanques de lastre de los diferentes tipos de barcos, ya que se adapta muy bien a los cambios de temperatura.

Puede observarse que los daños son localizados tanto en corrosiones, como en daños mecánicos y en peladuras y éstos están localizados. Su mayor porcentaje de alcance un 25% en corrosiones. Existen daños mecánicos y peladuras en los recubrimientos, pero el porcentaje es mejor, sólo de un 2%. Por lo tanto, la urgencia de reparación reside en la corrosión. Aunque los demás daños también haya que revisarlos y repararlos porque, aunque en este momento no sean graves pueden ser el comienzo de una corrosión posterior. La corrosión afecta a la estructura del material que forma el tanque y puede ser motivo de tener que inhabilitar ese tanque por falta de hermeticidad.

Con respecto al cuarteo y ampollas en el esquema de pintura, para este caso es inexistente, con lo cual no se actúa sobre estos dos puntos.

A partir de la información anterior podemos concluir que las oxidaciones son del 30% de la superficie. La mayor concentración de las oxidaciones y corrosiones se encuentran en refuerzos, picos, groeras¹, etc. Esto es debido a que es en esos lugares en donde se encuentran los mayores esfuerzos y acumulaciones de carga en el tanque.

El esquema de pintura o recubrimiento anterior se encuentra en buenas condiciones en un 70% de la superficie, es decir, que la mayor parte del tanque está en condiciones aceptables. Solo se repara el 30% del tanque en el que se encuentran daños.

Antes de volver a aplicar el esquema de pintura se deberá proceder a una preparación de la superficie. Para ello se deberá lavar con agua dulce a alta presión toda la superficie y se deberá desengrasar todas las zonas. Este trabajo ha de ser muy riguroso, ya que de él depende la adherencia de la protección. También se deberá proceder a un marreado (trabajo consistente en dar golpes con la marra para eliminar restos), picado y cepillado en las zonas de daños, para evitar y eliminar exfoliaciones, oxidaciones, golpes y desprendimientos. El decapado se deberá hacer según el grado St3 de acuerdo con la norma ISO 8501-3:2008 [3]². Finalmente se realizará la aplicación del sistema nuevo.

La norma ISO 8501-3:2008 [3] especifica dos grados de limpieza, el grado St2 y el grado St3. El grado de limpieza St2 indica que la superficie debe estar sin aceite, grasa ni suciedad a simple vista y sin mirar con ningún aumento. El

¹Se llama groera, en construcción naval, al agujero, abertura o conducto, cualquiera que sea su forma, practicado en una cubierta, mamparo u otro elemento de un buque, con el objeto de librar paso a un cabo, cadena, varilla, o al agua. En las embarcaciones a vela se denominan groeras a los orificios por donde pasan las trincas del bauprés.

² La superficie debe estar exenta de aceite, grasa y suciedad visibles, así como de cascarilla de laminación, óxido, recubrimientos de pintura y materias extrañas que presenten una escasa adherencia. Debe ser una limpieza manual y mecánica a fondo, que acabe con un lustre metálico procedente del substrato metálico.

St3 es el más exhaustivo a la hora de limpiar y preparar la superficie, ya que se pide que aparezca un lustre metálico, mientras que el primero solo pide que la superficie no tenga aceite, grasa, suciedad, óxido, cascarilla de laminación, recubrimientos de pintura y materias extrañas. La diferencia esencial entre los dos grados de limpieza es el lustre que hay que proporcionar en el grado St3, que debe ser metálico.

Este tanque está utilizado para lastrar, con lo que es frecuente la presencia de agua salada dentro de él, pero también a veces se encuentra vacío, según las condiciones del mar, buque etc. Es por ello que es posible encontrarse con presencia de corrosiones dentro de él. Las corrosiones se han producido en las partes más débiles, en zonas de soldaduras, en aberturas de los mamparos y en extremos. Como se puede ver en la siguiente foto correspondiente a una corrosión en una soldadura del mamparo con un refuerzo.

El recubrimiento es de tipo Epoxy que está formado por un oligómero que contiene de al menos dos grupos de epóxido y una agente endurecedor o catalizador. Este tipo de recubrimiento se usa para evitar la degradación de la estructura del tanque debido al contacto con el líquido que contiene.



Imagen 5.2. Pique de proa exfoliaciones, desprendimientos y oxidaciones en zona de refuerzos.

En la imagen 5.2 podemos ver que las numerosas corrosiones por picadura han ocasionado un desprendimiento de la soldadura del refuerzo. Se ve que se ha producido un proceso autocatalítico, que quiere decir que cuánto más se produce más se facilitan las condiciones para que se siga produciendo. Si se hubiese detectado antes se podría haber prevenido su propagación.



Imagen 5.3. Pique de proa exfoliaciones, desprendimientos y oxidaciones en zona de refuerzos.

Este tanque está sufriendo dos condiciones diferentes:

- Superficie en contacto con atmósfera marina.
- Zona de salpicadura. Esta zona es la más severa al ser mínimo el control anódico, catódico y de resistencia.

Algunos autores (Kee Peik et al. [4]), establecieron utilizando métodos numéricos la posibilidad de calcular la vida de la capa protectora, según las ecuaciones [1] y [2]:

$$[1]: t_r = C_1 * T_e^{C_2}$$

$$[2]: r_r = C_1 * C_2 * T_e^{C_2}$$

Siendo: t_r : profundidad de la corrosión.

r_r : ratio de corrosión en mm/año.

C_1 y C_2 : coeficientes determinados por medio de análisis estadístico, C_2 determina el progreso de la corrosión mientras que el coeficiente C_1 indica la ratio de corrosión anual.

T_e : año de exposición en años.

Sin embargo, este es un planteamiento meramente teórico, que no se ajusta a la realidad. Entre otras cosas porque el barco se haya expuesto a grandes flexiones lo que hace que los coeficientes no sean válidos. Un posible trabajo futuro sería analizar y desarrollar un modelo predictivo más eficaz para poder determinar con la mayor exactitud posible un fallo en la protección del tanque, teniendo en cuenta las flexiones del barco, las condiciones ambientales tanto externas como internas del tanque, fluido a alojar, etc.

| Designación | Capa | %T/U | m ² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total |
|-----------------------------|----------------|------|----------------|---------|-------|------|----------|---------------|-------------------|--------|-------|
| Tanque doble fondo n°1 Br | 1 ^a | 30 | 1150 | F-188 | G | 77 | 150 | 2,6 | 134,4 | 50 | 135 |
| Daños totales a reparar 30% | 2 ^a | 40 | 1150 | F-188 | R | 77 | 150 | 3,1 | 149,9 | 40 | 150 |

Tabla 5.4. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

En la tabla 5.4 se muestra el resumen del esquema de pintura a realizar. En la primera capa se realizará un parcheo del 30% de pintura, la superficie a aplicar será de 1150 m² de color gris, con unos sólidos en volumen de 77, el espesor de la película será de 150 μ con un rendimiento de 2,6 y un consumo de 134,4 litros. Se calcula una merma del 50%, esto quiere decir que el espesor de la capa en húmedo será un 50% mayor que en seco, esto es debido a la evaporación del disolvente. En la segunda capa se realizará un parcheo del 40% y el rendimiento aproximado será mayor, de un 3,1, además se consumirá mayor cantidad de litros 149,9.

5.4.2 Tanque sanitario

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|--------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque sanitario | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 3S | 1L | - | 2L | 3L | |

Tabla 5.5. Resultados de la inspección del tanque sanitario.

En la tabla 5.5 se pueden observar los datos obtenidos durante la inspección en el tanque sanitario; se observan corrosiones en zonas dispersas en un porcentaje entre el 6 y el 25%, aproximadamente el porcentaje de zona dañada es de un 10%. Se detectan varias zonas repintadas de color blanco en un 10% del tanque aproximadamente. Dichos repintados no tienen adherencia sobre el sistema anterior y pueden provocar la aparición de nuevos daños por esas zonas, debido a la diferencia de adherencia.

El esquema actual tiene ampollas en un porcentaje de un 10% en zonas localizadas del piso del tanque. En conclusión, estas ampollas revelan un fallo en la aplicación del anterior esquema de pintura.

En general, el 80% de la pintura anterior se encuentra en buen estado y se deberá reparar un 20% de la superficie debido a corrosiones, daños mecánicos, peladuras y ampollas.

A la hora de realizar esta reparación habrá que lavar con agua dulce a alta presión y temperatura (entre 150 y 180 bar y a una temperatura entre 70 y 90°C) así como desengrasar la superficie, además es necesario eliminar las ampollas, las zonas repintadas y todo posible rastro de sales en la superficie.

Todas las zonas que presenten algún fallo como exfoliaciones, oxidaciones, golpes o desprendimientos se deberán picar y cepillar. El grado de limpieza a aplicar será el St3 (limpieza manual y mecánica a fondo) según ISO

8501-3:2008 [3]. Después de realizar esta preparación de la superficie se deberá realizar la aplicación del esquema de pintura.

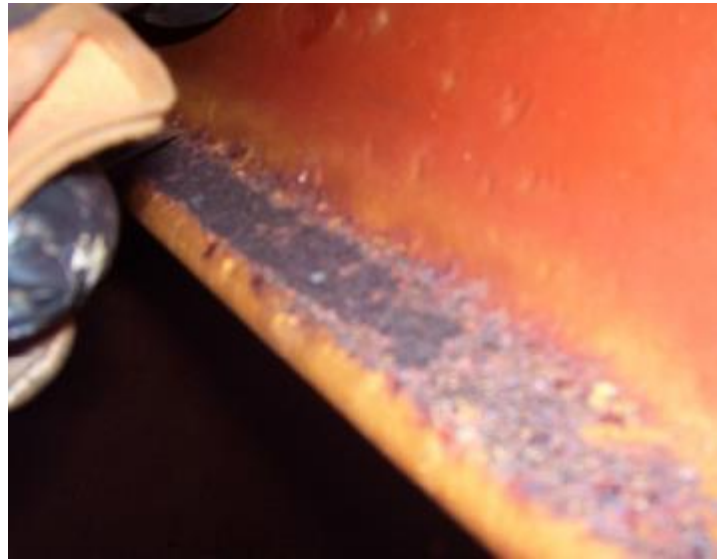


Imagen 5.4. Desprendimientos y oxidaciones en zona de refuerzos.



Imagen 5.5. Oxidaciones y falta de adherencias en zonas con repintados incompatibles.

| Designación | Capa | %T/U | m ² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total l |
|------------------------------|----------------|------|----------------|---------|-------|------|----------|---------------|-------------------|--------|------------|
| Tanque sanitario | 1 ^a | 20 | 150 | F-188 | G | 77 | 150 | 2,6 | 11,7 | 50 | 12 |
| Daños totales reparar 20% | 2 ^a | 30 | 150 | F-188 | R | 77 | 150 | 3,1 | 14,6 | 40 | 15 |

Tabla 5.4. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

En este caso las reparaciones son de un 20% y la tabla 5.4 indica el procedimiento a seguir para aplicar el nuevo recubrimiento. Se deberá parchear un 20% en la primera capa y un 30% en la segunda, para asegurar la adherencia de la protección anticorrosiva. Para esta reparación se utilizarán un total de 27 litros de pintura, la primera capa será en gris y la segunda en rojo. La merma de la primera capa será de un 50% y la de la segunda un 40%, esto es debido a la diferente composición con mayor o menos disolvente.

5.4.3 Tanque n°1A Central

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|--------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque 1A Central | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 3L | 1L | - | 2L | - | |

Tabla 5.5. Resultados de la inspección del tanque n° 1A Central.

Este tanque estará situado a proa del barco, en la parte central. Su numeración corresponde a su situación dentro del barco. En este tanque se observan unas corrosiones localizadas en el 15% de la superficie. Estas corrosiones están en los esfuerzos y las partes bajas del tanque. Estas partes son en las que mayor tiempo permanece el líquido y las más idóneas para acumular suciedad. Los esfuerzos son zonas de difícil aplicación del recubrimiento y es por ello que es la zona más probable en la que pueden aparecer corrosiones. En este tanque existen zonas repintadas de color blanco, en una extensión del 5%, estas zonas no tienen la adherencia adecuada sobre el sistema anterior. Si se contabilizan los daños totales, se obtiene que hay que reparar un 20% del tanque debido tanto a corrosiones como a zonas repintadas.

El 80% restante del tanque se observa que está en buenas condiciones, es decir, que el resto del esquema anticorrosivo está en buenas condiciones.

Para proceder a la reparación de este tanque se seguirán las consideraciones de la norma ISO 8501-3:2008 [3], y el grado que se debe seguir en las zonas dañadas será el St3, para poder conseguir una buena adherencia del esquema de pintura. Este grado de limpieza implica un lavado con agua dulce a alta presión (entre 150 a 180 bar) y con temperatura (entre 70° y 90°C), se debe desengrasar las zonas necesarias y eliminar las zonas repintadas incompatibles. Para completar la limpieza se eliminarán las exfoliaciones, oxidaciones, golpes y desprendimientos mediante el picado y cepillado.



Imagen 5.6. Imagen del tanque mostrando que la mayor parte de oxidaciones y corrosiones se encuentran en zonas de refuerzos y partes bajas.



Imagen 5.7. Imagen del tanque en dónde se observa una corrosión generalizada.

Las imágenes 5.6 y 5.7 muestran el estado interior del tanque. En la imagen 5.6 se observa las localizaciones de las corrosiones, mientras que en la imagen 5.7 se puede ver la forma de las erosiones y cavidades. A pesar de estas imágenes hay que decir que el esquema actual se encuentra en muy buenas condiciones con lo que estas zonas están protegidas.

| Designación | Capa | %T/U | m ² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total I |
|-----------------------------|----------------|------|----------------|---------|-------|------|----------|---------------|-------------------|--------|------------|
| Tanque 1A Central | 1 ^a | 20 | 580 | F-188 | G | 77 | 150 | 2,6 | 45,2 | 50 | 46 |
| Daños totales a reparar 20% | 2 ^a | 30 | 580 | F-188 | R | 77 | 150 | 3,1 | 56,5 | 40 | 57 |

Tabla 5.6. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

En la tabla 5.6 se detallan los trabajos a realizar para aplicar un nuevo esquema de pintura de forma correcta. En este tanque los daños son del 20%, según la tabla anterior deberemos aplicar dos capas para parchear los daños, la primera capa será del 20% de la superficie del tanque y la segunda del 30%, la primera capa siempre ha de ser mayor que la primera para asegurar la protección total de la zona.

5.4.4 Tanque doble fondo nº 1 BR

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|--------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Doble fondo Nº 1 Br | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 3L | 1L | - | 2L | 4S | |

Tabla 5.7. Resultados de la inspección del tanque doble fondo nº1 babor.

El presente tanque está situado en la parte baja del buque (doble fondo) y en la banda de babor. En este tanque se observan unas corrosiones del 5%, éstas se encuentran en partes bajas de los mamparos y en los techos. Se aprecian ampollas en un 35% de la superficie del tanque y también hay falta de adherencia en la zona adyacente de las ampollas. En total hay unos daños de un 40%. Los daños mecánicos son menores al 2% en una zona localizada.

Para obtener una buena preparación de la superficie antes se debe desengrasar y lavar con agua a alta presión (entre 150 y 180 bar) y con temperatura (entre 70 y 90°) para asegurar la eliminación de sales, ampollas y las zonas con repintados. Además se deben eliminar las exfoliaciones, oxidaciones, golpes y desprendimientos mediante picado y cepillado. Estos trabajos indican que el grado de limpieza será de St3 según norma ISO 8501-3:2008 [3].



Imagen 5.8. Imagen de las ampollas dispersas por todo el tanque en un 35%.

| Designación | Capa | %T/U | m ² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total I |
|-----------------------------|------|------|----------------|---------|-------|------|----------|---------------|-------------------|--------|------------|
| Tanque doble fondo n°1 Br | 1ª | 40 | 540 | F-188 | G | 77 | 150 | 2,6 | 84,2 | 50 | 85 |
| Daños totales a reparar 40% | 2ª | 50 | 540 | F-188 | R | 77 | 150 | 3,1 | 87,7 | 40 | 88 |

Tabla 5.8. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

En este tanque los daños son del 40%, según la tabla 5.8 deberemos aplicar dos capas parcheando el 40% en la primera capa y en la segunda un 50%.

5.4.5 Tanque doble fondo n° 1 ER

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|--------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Doble fondo N° 1 Er | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2L | 1L | - | 2L | 3S | |

Tabla 5.9. Resultados de la inspección del tanque doble fondo n°1 estribor.

Como se desprende de la tabla 5.9 hay un 5% de corrosiones, éstas se deben a daños mecánicos. Se encuentran ampollas en un 15% de la superficie del tanque de forma dispersa. En la zona próxima a las ampollas se detecta una falta de adherencia entre el sistema de pintura y el acero. Hay un 20% de zonas repintadas de color blanco y no tiene la adherencia adecuada sobre el sistema

anterior. Si contabilizamos todas las zonas dañadas tenemos que reparar un 40%.

Las actividades a realizar para asegurar una buena adherencia de la siguiente capa serían lavar con agua dulce a alta presión (entre 150 y 180 bar) y con alta temperatura (entre 70 y 90 °C), desengrasar todas las zonas en las que se vaya a pintar, eliminar las ampollas y repintados incompatibles. También es necesario eliminar las exfoliaciones, oxidaciones, golpes y desprendimientos mediante picado y cepillado. Para realizar estas actividades se seguirá la norma ISO 8501-3:2008 [3], y el grado elegido para la limpieza es el St3.



Imagen 5.9. Ampollas dispersas por todo el tanque en un 15%.

| Designación | Capa | %T/U | m ² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total I |
|-----------------------------|------|------|----------------|---------|-------|------|----------|---------------|-------------------|--------|------------|
| Tanque doble fondo n°1 Er | 1ª | 40 | 540 | F-188 | G | 77 | 150 | 2,6 | 84,2 | 50 | 85 |
| Daños totales a reparar 40% | 2ª | 50 | 540 | F-188 | R | 77 | 150 | 3,1 | 87,7 | 40 | 88 |

Tabla 5.10. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

Observando la tabla 5.8 se ve que el procedimiento de pintura constará de dos capas. La primera capa cubrirá el 40% del tanque y la segunda el 50%. La primera capa cubrirá una superficie de 540 m² de color gris y con un consumo aproximado de 84,2 litros. La diferencia con la segunda capa reside en el color, que será de color rojo y en el consumo de litros de pintura a utilizar, que será mayor en la segunda capa.

5.4.6 Tanque doble fondo n°1 Central

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|--------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque n°1 Central | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2L | 1L | - | 1L | 3S | |

Tabla 5.11. Resultados de la inspección del tanque doble fondo n°1 central.

Este tanque tiene menos daños que los anteriores, como se puede observar en la tabla 5.11. La corrosión está presente de forma localizada en un 2% de la superficie del tanque. Estos daños se encuentran en los refuerzos de los tanques. Se observa una pequeña superficie de peladuras y un 10% de la superficie del tanque con ampollas, distribuidas de forma dispersa. Las ampollas provocan que haya falta de adherencia en zonas próximas a ellas. Con estos daños la zona a reparar será de un 10%.

Para conseguir una óptima superficie antes de aplicar el esquema de pintura se debe optar por el grado de limpieza St3 según norma ISO 8501-3:2008 [3]. Este grado de limpieza consta de una limpieza a alta temperatura (entre 70 y 90 °C) y a alta presión (entre 150 y 180°C), con un desengrase de las zonas y picado y cepillado (para eliminar las exfoliaciones, oxidaciones, golpes y desprendimientos). Con estas pautas de preparación se consigue una superficie libre de ampollas, repintados incompatibles y de grasas, así la siguiente capa de pintura anticorrosiva tendrá una adherencia óptima y protegerá a la estructura del tanque.

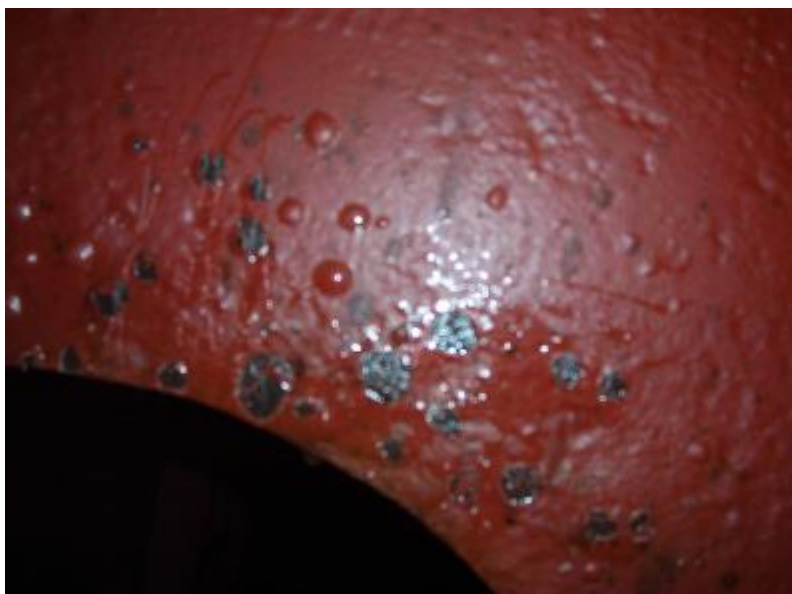


Imagen 5.10. Imagen de la falta de adherencia entre el sistema y el acero, en la zona próxima a las ampollas.

| Designación | Capa | %T/U | m ² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total I |
|-----------------------------------|------|------|----------------|---------|-------|------|----------|---------------|-------------------|--------|------------|
| Tanque doble fondo nº1 central | 1ª | 10 | 710 | F-188 | G | 77 | 150 | 2,6 | 27,7 | 50 | 28 |
| Daños totales reparar 10% | a 2ª | 20 | 710 | F-188 | R | 77 | 150 | 3,1 | 46,1 | 40 | 47 |

Tabla 5.12. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

En la tabla 5.12 se observa el procedimiento de pintura (esquema de pintura) a ejecutar. En este tanque el porcentaje de daños es mejor, es por ello que la reparación sólo será en un 20% de la superficie del tanque.

5.4.7 Tanque n°2 doble fondo Br

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|---------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque n°2 Doble fondo Br | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2S | 1S | 2L | 2L | 3S | |

Tabla 5.13. Resultados de la inspección del tanque doble fondo n°2 babor.

El tanque a examinar está situado en la parte baja del buque en el costado de estribor y es el segundo tanque según avanzamos hacia popa. En la tabla 5.13 se pueden observar los daños encontrados. En este tanque las corrosiones son de un 2% de forma dispersa y éstas se encuentran en los refuerzos del tanque, en los techos y en las partes bajas. Los daños mecánicos son menores del 2%. El cuarteo y las peladuras se encuentran en zonas localizadas en un porcentaje del 2%. El daño más extendido es el de las ampollas en un 10% de forma dispersa. Se observa falta de adherencia entre el sistema de pintura y el acero. En total hay que reparar una superficie del 5% del tanque debido a que los daños se encuentran en las mismas zonas.

En las zonas en donde existe el daño se debe proceder según la norma ISO 8501-3:2008 [3] aplicando el grado St3, que implica todas las acciones descritas anteriormente.



Imagen 5.11. Imagen del interior del tanque n°2 doble fondo babor.

La imagen 5.11 muestra los desprendimientos y falta de adherencias entre el sistema y el acero. Los fallos están localizados en los techos de tres calles a lo largo de todo el tanque, 3% aproximadamente.

| Designación | Capa | %T/U | m² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total I |
|----------------------------|------|------|-----|---------|-------|------|-------|------------|----------------|--------|---------|
| Tanque doble fondo n°2 Br | 1ª | 5 | 610 | F-188 | G | 77 | 150 | 2,6 | 11,9 | 12 | 85 |
| Daños totales a reparar 5% | 2ª | 10 | 610 | F-188 | R | 77 | 150 | 3,1 | 19,8 | 20 | 88 |

Tabla 5.14. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

5.4.8 Tanque nº 1 profundo ER

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|--------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque nº 1 Profundo ER | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2L | 2L | - | 2L | 3S | |

Tabla 5.15. Resultados de la inspección del tanque nº1 profundo estribor.

La tabla 5.15 muestra el resultado de la inspección en el tanque nº1 profundo estribor. Los daños totales en este tanque son del 10% que se dividen en un porcentaje de corrosiones del 2%, estas corrosiones están provocadas por daños mecánicos. Las ampollas están dispersas por todo el tanque en un 10% de la superficie. Debido a las ampollas se aprecia falta de adherencia en las zonas cercanas a las ampollas.

Previamente a la aplicación de la nueva capa protectora se debe proceder a una limpieza con agua dulce a una presión entre 150 y 180 bar y una temperatura de entre 70 a 90°C. Con este lavado se consigue eliminar las ampollas y zonas repintadas. También se debe proceder a un desengrasado en todas las zonas en las que se va a volver a aplicar el esquema. Se debe picar y cepillar todas las zonas que presenten exfoliaciones, oxidaciones, golpes y desprendimientos. Esta es la descripción de los trabajos a realizar según el grado de limpieza St3 de la norma ISO 8501-3:2008 [3]. Posteriormente se deberá aplicar la capa protectora.



Imagen 5.12. Imagen del interior del tanque nº1 profundo estribor.

La imagen 5.12 enseña la falta de adherencia entre el sistema anterior y el acero en la zona próxima a las ampollas.

| Designación | Capa | %T/U | m ² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total I |
|-------------------------------------|----------------|------|----------------|---------|-------|------|----------|---------------|-------------------|--------|------------|
| Tanque profundo ER n ^o 1 | 1 ^a | 10 | 540 | F-188 | G | 77 | 150 | 2.6 | 21 | 50 | 22 |
| Daños totales a reparar 10% | 2 ^a | 20 | 540 | F-188 | R | 77 | 150 | 3.1 | 35,1 | 40 | 36 |

Tabla 5.16. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

La tabla 5.16 especifica las capas a realizar para mejorar la protección del acero del tanque. En esta ocasión se observa que los daños a reparar son de un 10% de la superficie.

5.4.9 Tanque n^o2 profundo ER

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|-------------------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque n ^o 2 Profundo ER | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | EPO | 1763 | 2L | 2L | - | 2L | 2S | |

Tabla 5.17. Resultados de la inspección del tanque n^o2 profundo estribor.

Como muestra la tabla 5.17, las corrosiones están presentes en un 1% de la superficie aproximadamente, estas corrosiones están debidas a daños mecánicos. Se observa la existencia de ampollas en un 2% de la superficie total, esto ha provocado falta de adherencia en las zonas próximas a las ampollas. Los daños a reparar son de un 3%.

El lavado de las superficies dañadas ha de hacerse con alta presión (entre 150 y 180 bar) y a una temperatura superior a la de ambiente (entre 70 a 90°C), de esta forma se asegura la limpieza de la zona, la eliminación de las ampollas y de las zonas con repintados incompatibles. Se deben eliminar las exfoliaciones, oxidaciones, golpes y desprendimientos mediante picado y cepillado. La eliminación de estos defectos se debe a que por éstos pueden aparecer defectos en las capas posteriores de protección. La norma utilizada para realizar esta limpieza es la ISO 8501-3:2008 [3] y el grado St3.



Imagen 5.13. Estado del tanque n^o2 profundo estribor.

En la imagen 5.13 se puede observar el estado interior del tanque n°2 profundo estribor. En general se observa un buen estado del tanque, pero tiene ampollas dispersas por todo el tanque, en un 2% de su superficie, aproximadamente.

| Designación | Capa | %T/U | m ² | Calidad | Color | S.V. | DFT μ | Rto. Aprox | Cons. Aprox. L | Merma% | Total l |
|----------------------------|----------------|------|----------------|---------|-------|------|----------|---------------|-------------------|--------|------------|
| Tanque n°2 profundo Er | 1 ^a | 3 | 2100 | F-188 | G | 77 | 150 | 2,6 | 24,5 | 50 | 25 |
| Daños totales a reparar 3% | 2 ^a | 6 | 2100 | F-188 | R | 77 | 150 | 3,1 | 40,9 | 40 | 41 |

Tabla 5.18. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

La tabla 5.18 muestra las indicaciones para aplicar el nuevo esquema de pintura y la calidad con el que tiene que ser indicado. Como en los anteriores casos, el espesor de la película debe ser 150 μ y los sólidos en volumen deben ser de 77. La merma es igual en todos los casos, lo que difiere son los porcentajes de superficie a reparar y los litros a utilizar.

5.4.10 Tanque agua dulce n° 13 Br

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|----------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque agua dulce n° 13 BR | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | NA | NA | 2L | 2L | 3S | 4S | 4S | |

Tabla 5.19. Resultados de la inspección del tanque n°13 babor.

Las corrosiones están presentes en un 5% de forma localizada, como se puede observar en los resultados reflejados en la tabla 5.19. Estos daños son debidos a daños mecánicos y en las zonas en las que se ha repintado sin seguir el esquema original. Existe cuarteo en el 5% de la superficie del tanque. También existen peladuras y ampollas en un 30% de la superficie de forma dispersa. Considerando la dispersión de los daños se debe reparar un total del 70% de la superficie, para asegurar la adherencia entre las capas y entre el sistema original y el acero.

El trabajo a realizar debe seguir las indicaciones de limpieza de la norma ISO 8501-3:2008 [3] para el grado St3. Estas indicaciones incluye un lavado con agua dulce a alta presión y temperatura (entre 150 a 180 bar y entre 70 a 90°C) para eliminar las ampollas y los repintados incompatibles, un desengrasado en todas las zonas posibles. Además se debe proceder a un picado y cepillado de las zonas que presenten exfoliaciones, oxidaciones, goles y desprendimientos. También se ha de efectuar una limpieza con chorro abrasivo a fondo. Estas indicaciones siguen las directrices de limpieza de la norma ISO 8501-3:2008 y los grados de limpieza a aplicar sería el St3 y el Sa2^{1/2}. Como se observa, el grado de preparación para este tanque es mayor que para los anteriores. La razón de una preparación mayor es debido a que este tanque se usa para almacenar agua para el consumo de la tripulación (aseo, cocina, etc.)

y es por ello que la calidad de la pintura y su adherencia debe ser la mejor posible.



Imagen 5.14. Imagen del estado del interior del tanque nº 13 babor.

En la imagen 5.14 podemos observar falta de adherencia entre capas y el sistema con el acero.

5.4.11 Tanque agua dulce nº 13 Er

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|----------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque agua dulce nº 13 ER | | | | | | | | |
| Mamparos, techos y pisos | NA | NA | 2L | 2L | 2L | 4S | 4S | |

Tabla 5.20. Resultados de la inspección del tanque nº13 estribor.

Las corrosiones presentes en este tanque ascienden a un total del 2% de la superficie del tanque. Estas corrosiones son debidas a daños mecánicos y a repintados que no respetan el esquema de pintura original. El porcentaje de superficie en el que se encuentran presentes ampollas es de un 50%, esto provoca que en un porcentaje alto del tanque exista falta de adherencia entre el sistema de pintura y el acero, así como entre las capas. Debido a la dispersión de los daños en la pintura la superficie total a reparar asciende a un 70%.

Este tanque es un tanque almacén de agua dulce. El agua dulce a bordo de un buque se utiliza tanto para el aseo del personal, como para la cocina, es por ello que el estado de la capa anticorrosiva ha de ser óptimo. Por esta razón se deben aplicar dos grados de limpieza a este tanque el Sa 2^{1/2} y el St3 según norma ISO 8501-3:2008[3]. El primer grado de limpieza es una limpieza con chorro abrasivo a fondo y el segundo implica un lavado y desengrasado de las superficies a alta presión y temperatura (entre 150 y 180 bar y entre 70 y 90°C), así como picado y cepillado de daños tales como exfoliaciones, oxidaciones,

golpes y desprendimientos. Con todo ello se consigue una preparación óptima de la superficie para la aplicación del siguiente esquema de pintura.



Imagen 5.15. Estado interior del tanque nº13 estribor.

En este tanque se encuentran ampollas dispersas por todo el tanque en un 50% aproximadamente, como se puede apreciar en la imagen 5.15.

5.4.12 Tanque nº 2 profundo Br

| Área | Tipo genérico | Fórmula | Corrosión | Daño mecánico | Cuarteo | Peladuras | Ampollas | Prioridad |
|-------------------------|---------------|---------|-----------|---------------|---------|-----------|----------|-----------|
| Tanque nº 2 Profundo BR | | | | | | | | |
| Mamparos y techos | EPO | 1763 | 2L | 2L | 1L | 2S | 2L | |
| Pisos | EPO | 1763 | 2L | 2L | 2L | 3S | 5S | |

Tabla 5.21. Resultados de la inspección del tanque nº2 profundo babor.

Las corrosiones están presentes en un 5% de la superficie del tanque. Éstas son debidas a daños mecánicos (el líquido que contenga al caer). En la mayor parte del tanque existen ampollas de forma dispersa, el porcentaje de la superficie del piso cubierta por éstas es de un 90%, esto provoca falta de adherencia del sistema de pintura en el piso del tanque. La totalidad de los daños a reparar en el total de superficie del tanque es de un 25%. Todos estos datos fueron obtenidos durante la inspección y se observan en la tabla 5.21.

En este tanque se va a proceder con una limpieza que implica el grado Sa 2^{1/2} y el grado St3 según norma ISO 8501-3-2008 [3]. El primer grado de limpieza es una limpieza con chorro abrasivo a fondo y el segundo implica un lavado y desengrasado de las superficies a alta presión y temperatura (entre 150 y 180 bar y entre 70 y 90°C), así como picado y cepillado de daños tales como exfoliaciones, oxidaciones, golpes y desprendimientos. Con todo ello se consigue una preparación óptima de la superficie para la aplicación del siguiente esquema de pintura.



Imagen 5.16. Oxidaciones en los mamparos del tanque nº2 profundo babor.



Imagen 5.17. Estado del suelo del tanque nº 2 profundo babor.

En la imagen 5.16 se muestran los daños mecánicos y oxidaciones en techos y mamparos que se encuentra 5% aproximadamente de la superficie del tanque. Las ampollas se encuentran dispersas por todo el piso en un 90% aproximadamente, se pueden observar en la imagen 5.17.

5.5 Sumario

A modo de resumen de este capítulo podemos señalar que los tanques con mayor corrosión son los situados desde la parte central hasta la proa (Pique de Proa, Tanque Sanitario, Tanque 1A Central y Tanque Doble Fondo Babor y Tanque doble fondo Estribor). Esta incidencia se debe a la diferencia de temperatura que existe en esta parte debido a los efectos medioambientales (lluvia o viento) y a los gradientes de temperaturas que son más acusados en esta parte del barco.

Los tanques más dañados de este barco y que necesitan mayores reparaciones son los tanques de agua dulce nº13 Br y Er, que necesitan una reparación del 70% de su superficie. Si bien es cierto que la reparación se debe principalmente a la presencia de ampollas y peladuras y no tanto al estado de corrosión de sus planchas.

Los siguientes tanques en orden de reparación son los tanques de doble fondo nº1 Babor y Estribor. Ambos tanques tienen daños en un 40% de su superficie. Ambos tanques tienen daños parecidos en su capa protectora. Aunque no son los que más incidencias tienen en el campo de la corrosión, sí que tienen gran incidencia en las ampollas, teniendo gran parte de su superficie afectada por este defecto. Se considera que los tanques de doble fondo tienen una humedad relativa del 90 al 100% [5].

Algunos autores tales como, Mendoza et al [8] establecieron que el tiempo de estado mojado de la superficie depende de factores climáticos, entre ellos la humedad, las horas de sol, la temperatura tanto del aire como de la superficie del metal, la velocidad del viento y la duración y frecuencia de la lluvia y niebla. Dentro de un tanque no pueden coexistir todos los factores. No obstante, la influencia de las horas de sol es la más preponderante ya que aumenta la temperatura en el interior del recinto

Por otra parte Melcher et al. [5] estableció que la corrosión era función de tres parámetros: tiempo de estado mojado de la superficie, depósitos de sales y temperatura. En el caso que se trata podría llevarnos a pensar que no tendremos depósitos de sales, debido a que estamos en el interior de un buque, pero los tanques aquí tratados son tanto tanques de agua dulce como tanques de lastre. En las operaciones de lastrado y deslastrado de tanques se llenan y vacían con agua salada, es por ello que la presencia de sal en el interior de los tanques no puede ser despreciada.

Los tanques con menores daños son el tanque nº2 Profundo Er y el tanque nº2 Doble fondo Br. Estos dos tanques se encuentran en la parte baja del buque y por ello tienen una temperatura más constante, debido a que siempre están sumergidos y cercanos al agua, que hace ayuda a disipar altas temperaturas y que el tanque tenga una temperatura constante.

Un factor a tener en cuenta es el económico. Si no protegemos las superficies de forma adecuada, esto puede indicar una pérdida económica importante. De Baere et al [9] realizó un cálculo del coste de construcción de los

tanques de lastre, factor a tener en cuenta para compaginarlo con los costes derivados de sus reparaciones. En su trabajo destaca que la aplicación de una correcta capa protectora de la superficie puede minimizar los gastos de reparación. De Baere et al [10] también estableció la mejor forma para realizar la protección continuada de los tanques de lastre después de la aplicación del recubrimiento. Esta protección se realiza por medio de ánodos de protección, que generan una corriente eléctrica capaz de impedir la formación de capas corrosivas.

Las capas protectoras son función de la composición del acero sobre el que descansan, es por ello, que Elboujdaini et al [11] realizó un ensayo con diferentes tipos de acero para determinar qué capas protectoras son las más adecuadas dependiendo de los elementos químicos presentes en el acero.

Un punto a tener en cuenta son los contaminantes que se pueden transportar en los tanques de lastre. Eames et al [12] establecieron la mejor forma de poder evitar esta contaminación por organismos. Estos organismos también pueden condicionar la aceleración de la corrosión dentro de los tanques. Es por ello que una línea futura de investigación sería cómo poder evitar la presencia de estos organismos y así mismo como evitar que aceleren la corrosión con sus presencia.

5.6 Bibliografía

- [1] Otero Huerta, E. (1998). *Corrosión y degradación de materiales*. Editorial Síntesis.
- [2] Real Decreto 1837/2000, de 10 de noviembre por el que se aprueba el Reglamento de inspección y certificación de buques civiles.
- [3] UNE-EN ISO 8501-3:2008. Preparación de sustratos de acero previa a la aplicación de pinturas y productos relacionados. Evaluación visual de la limpieza de las superficies. Parte 3: Grados de preparación de soldaduras, bordes y otras áreas con imperfecciones en la superficie.
- [4] Kee Paik J., Park Y., Sun Hwagn J. &Thayamballi, A. (2013). *A time-dependent corrosion wastage model for seawater ballast tank structures of ships*. Corrosion Science.
- [5] C.P. Gardiner, R.E. Melchers. (2001). *Enclosed atmospheric corrosion in ship spaces*. British Corrosion Journal 36 (4) 272-276.
- [6] C. Guedes Soares, Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang. (2005). *Non-linear corrosion model for immersed steel plates accounting for environmental factors*. Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers 113 306-322.
- [7] C. Guedes Sorares, Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang. (2008). *Corrosion wastage model for ship crude oil tanks*. Corrosion Science 50 (11) 3095-3106.
- [8] A. Mendoza, F. Corvo (1999). *Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel*. Corrosion Science 41 75-86.
- [9] De Baere K., Lenaerts S., Potters G., Rigo P., Van Passel S. &Verstraelen H. (2013). *Reducing the cost of ballast tank corrosion: an economic modeling approach*. Marine Structures 32 (2013) 136-152.
- [10] De Baere K., Lenaerts S., Potters G., Rigo P., Van Passel S. &Verstraelen H. (2013). *Study on alternative approaches to corrosion protection of ballast tank using an economic model*. Marine Structures 32 (2013) 1-17.
- [11] Elboudjaini M., Ghali, E. & Sastri V.S. (2006). *Corrosion Prevention and Protection*. Editorial Willey.
- [12] Eames I., Landeryou M., Greig A. & Snellings J. (2006). *Continuous flushing of contaminants from ballast water tanks*. Marine Pollution Bulletin, 556, Issue 2, Páginas 250-260.

Capítulo 6. Caso B. Estudio de la corrosión en el casco de un buque

Capítulo 6. Caso B. Estudio de la corrosión en el casco de un buque

6.1 Introducción

En el presente trabajo se realiza un estudio de los daños del casco de un buque.

Se trata de un buque patrullero de unos 60 m de eslora que tiene 50 cuadernas. Los datos técnicos se omiten debido a un acuerdo de confidencialidad.

Este barco fue inspeccionado tomando datos de forma homogénea para estudiar el estado de su casco. Como se puede observar en la figura se han tomado suficientes datos como para tener una buena visión de su estado.

[1] La protección anticorrosiva realizada en un buque depende de varios factores:

- Medio la que se va a haber expuesto el elemento.
 - Ambiente marino.
 - Inmersión.
 - Cambios de temperatura.
 - Exposición atmosférica.
 - Ambiente interior.
- Material a proteger.
- Medidos preventivos que tiene la instalación hacia la corrosión de sus elementos (protección catódica).

Al realizar la aplicación de la capa protectora hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Limpieza de la superficie.
- Preparación de la superficie.
- Pretratamiento (si fuese necesario).
- Rugosidad de la superficie.
- Intervalos de renovación de la capa protectora.

La medición del grosor de la chapa del casco es un valor que indica la cantidad de pérdida de material de los elementos estructurales, este dato se usa para conocer la evolución de la corrosión y poder prever su crecimiento con respecto al tiempo, de esta forma se podrían alargar o acortar los períodos de mantenimiento.

Tradicionalmente se ha considerado que la corrosión sigue un patrón lineal, pero Melchers [3] estableció que la corrosión tiene un crecimiento muy alto en sus primeros momentos, pero que posteriormente se estabiliza.

Melchers et al [4] describe el proceso de corrosión en un buque como un proceso complejo, no lineal y que es función de la oxidación y de la actividad de bacterias anaeróbicas. De esta conclusión se desprende que no es fácil predecir el crecimiento de la corrosión con el tiempo y que ésta depende de multitud de factores y no sólo de haber realizado una buena protección de la superficie. Como depende de múltiples factores, también se puede observar que la corrosión no va a ser uniforme en toda la superficie de una instalación, sino que ésta dependerá de la incidencia de los factores que le afecten.

6.2 Estudio

La técnica empleada para realizar este estudio ha sido la de ultrasonidos, que se obtiene una medida del espesor de la chapa debido a un pulso. Los ultrasonidos son ondas sonoras cuya frecuencia es mayor de 20000 Hz. Para obtener el espesor se mide el tiempo transcurrido entre la emisión y la recepción de dichas ondas. La determinación del espesor de una chapa tiene por objeto el control de la corrosión, de esta forma se tienen en cuenta tanto el espesor inicial, como el mínimo admisible así como la cantidad de material debida a la corrosión.

Para ello se ha empleado un medidor de espesores de la casa PCE Ibérica:

- Modelo PT-UTGM3-E Advanced.
- Medición por Eco Múltiple, puede medir desde 2,5 a 60 mm.
- Para realizar la medida no es necesario quitar la pintura.

- Precisión es de $\pm 0,03$ mm.
- Velocidad de ultrasonido de 1250 a 9999 m/s.
- Normativa ASTM E797.

6.2.1 Estado del buque

En las figuras 1 y 2 podemos ver las catas realizadas en el barco y se puede observar que el estado del barco es bueno en normas generales, aunque tiene zonas en las que se observan corrosiones de tipo pitting o golpes.

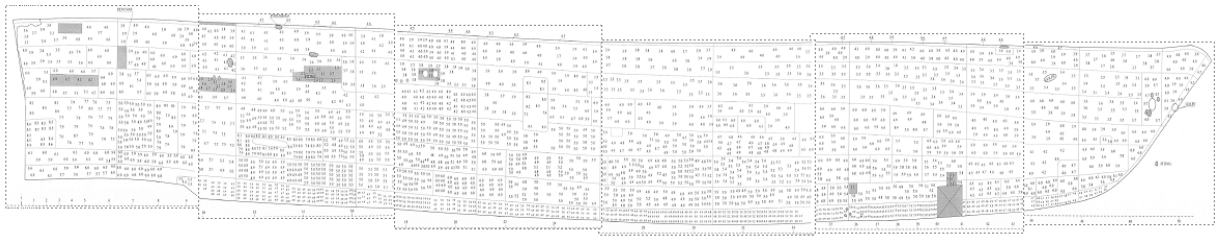


Figura 6.1. Vista de toma de espesores en Estribor.

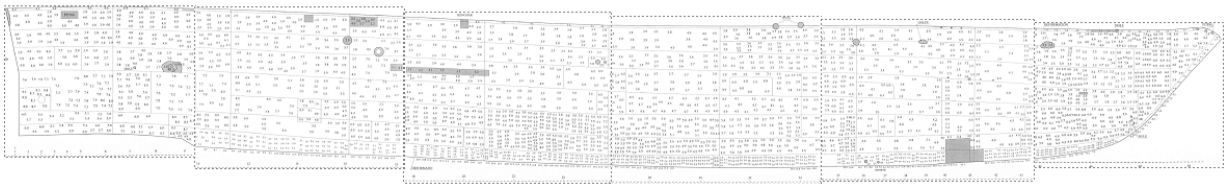


Figura 6.2. Vista de toma de espesores en Babor.

En las figuras 6.1 y 6.2 se observa que la zona media del barco es la que menos daños ha sufrido, no así en popa y proa en las que se ven que en esas zonas tiene daños. En popa se observan daños coincidentes con una estructura que tiene en la cubierta.

En el gráfico 6.1 se muestra el porcentaje de corrosión del barco completo. Como se puede observar en la mayor parte de la parte de estribor del barco no se observan daños superiores al 15%, salvo en zonas determinadas (popa).

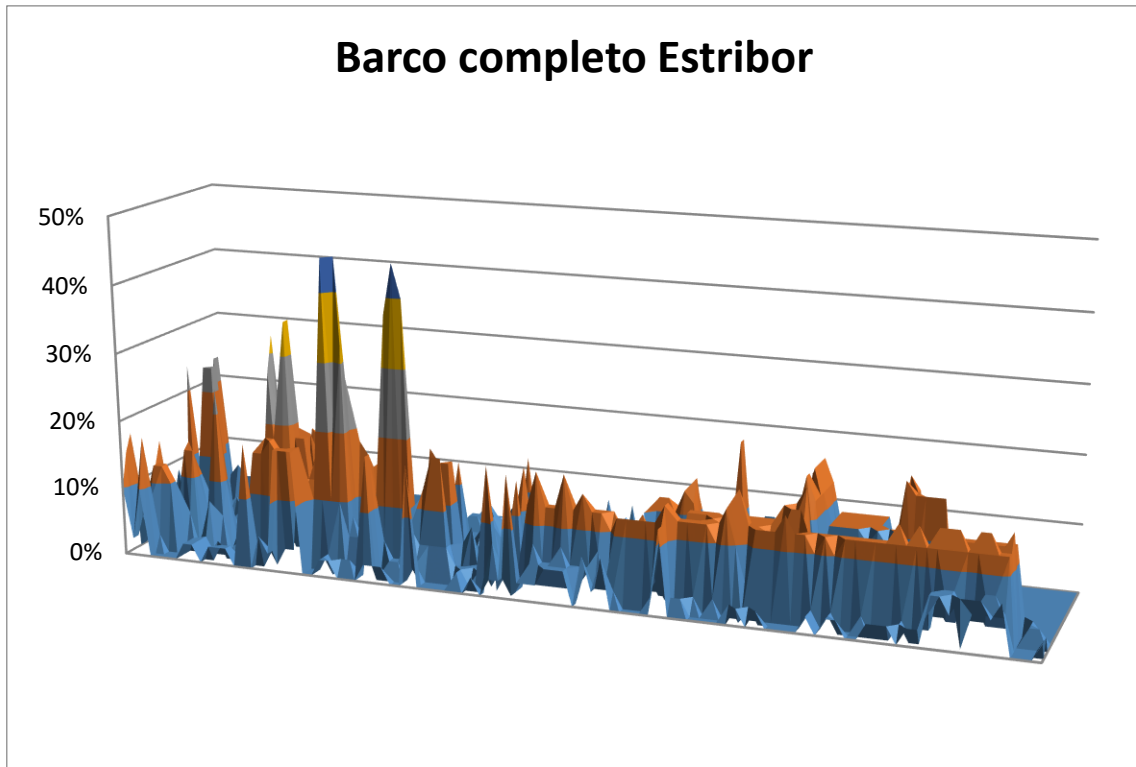


Gráfico 6.1. Visión global de porcentajes de corrosión en el lado de estribor.

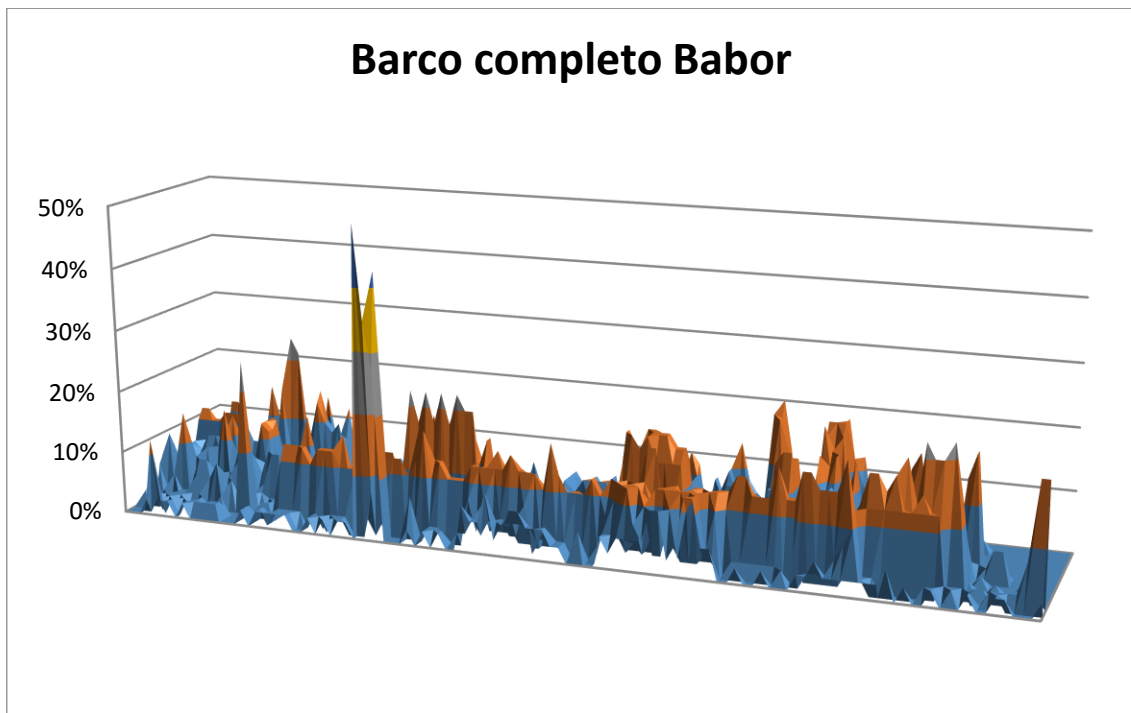


Gráfico 6.2. Visión global de porcentajes de corrosión en el lado de babor.

Como se puede observar en los gráficos 6.1 y 6.2 el porcentaje de corrosión es mayor en proa y popa y menor en la parte media del barco. Se observan que ambos perfiles son muy parecidos, si bien es cierto que en la

banda de babor hay un valor que sobrepasa la línea del 40% mientras que en estribor todos los valores están por debajo del 40% de corrosión.

6.2.2 Estado detallado del buque.

A continuación, se detalla el estado en las zonas afectadas.

Centrándonos en áreas más específicas observamos que entre las cuadernas 2 y 6 en estribor tenemos una zona de corrosión importante. A continuación se muestran los datos, en los que se puede observar que hay una corrosión del 15%.

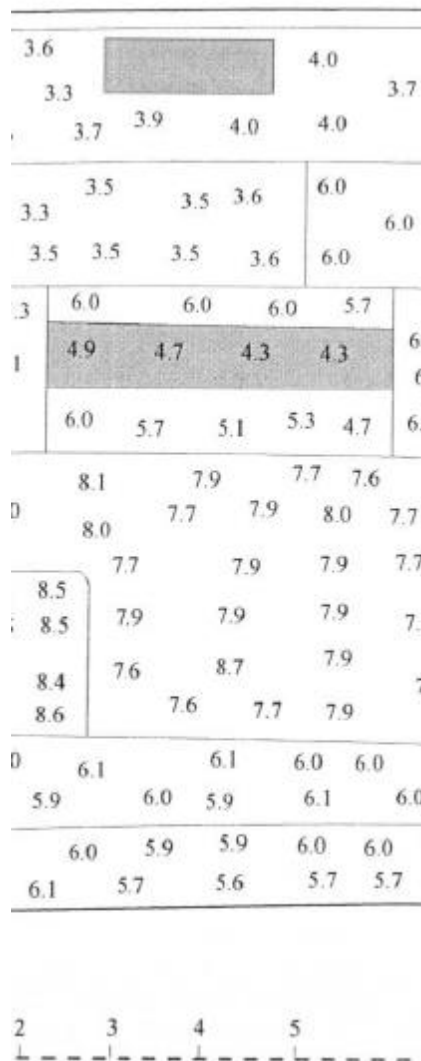


Figura 6.3. Datos relativos al gráfico 6.3.

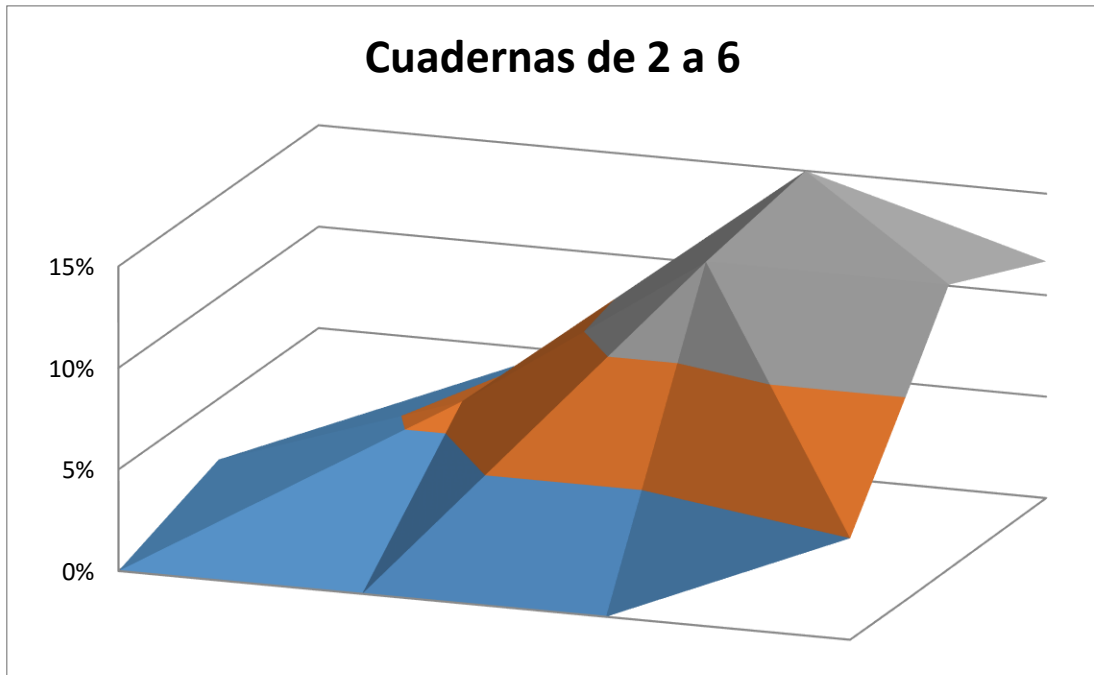
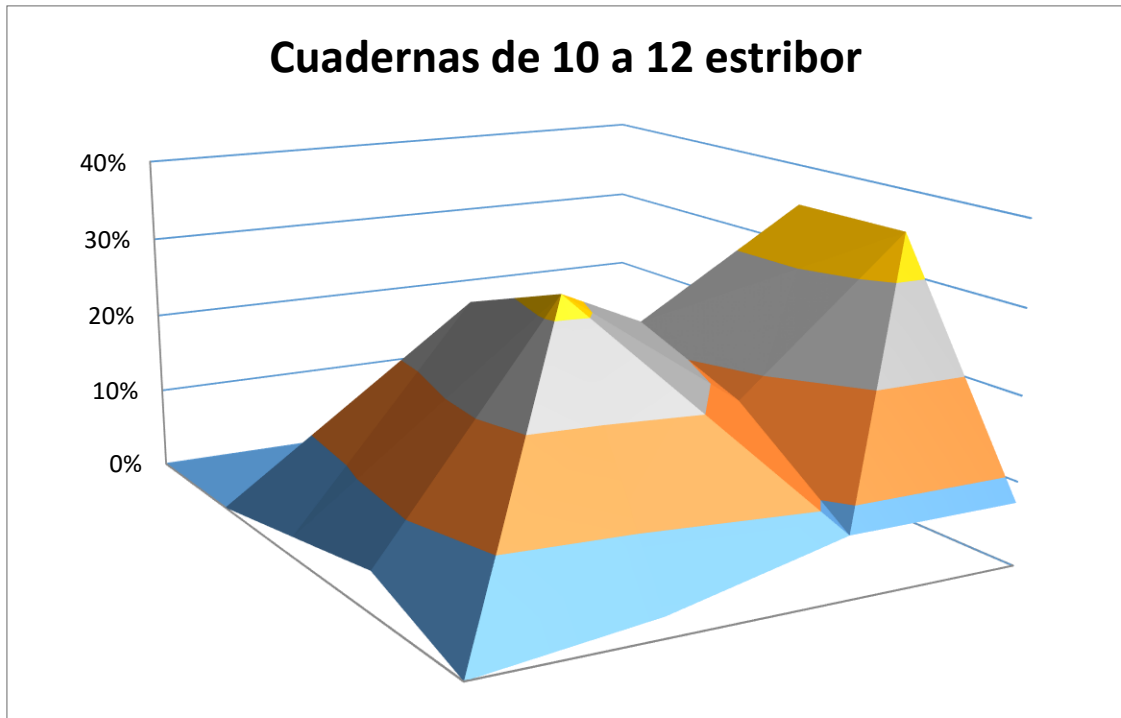


Gráfico 6.3. Gráfico porcentaje corrosión en la zona de popa estribor.

Como se puede observar en el gráfico 6.3 en la zona hay un crecimiento importante del porcentaje de parte corroída, que en su valor máximo alcanza un 15%.

| | | | |
|-----|-----|-----|-----|
| 4.2 | 4.2 | 4.1 | 4.2 |
| 4.1 | 4.1 | 4.1 | 4.2 |
| 4.0 | 4.1 | 4.1 | 4.2 |
| 3.9 | 2.9 | 3.1 | 3.6 |
| 3.6 | 3.3 | 2.9 | 3.7 |
| 3.8 | 2.7 | 3.7 | 2.9 |
| | | 2.6 | |
| 4.0 | 3.9 | 3.7 | |

Figura 6.4. Datos relativos al gráfico 6.4.



Gráfica 6.4. Gráfica porcentaje corrosión entre las cuadernas 10 a 12 de estribor.

En el gráfico 4 se puede observar que los valores que aparecen de la parte estudiada de la figura 4 llegan a tener un porcentaje de corrosión próximo del 35%. Esta parte del barco se clasificó como “parte que necesita reparación” debido al alto porcentaje de corrosión que tenía.

| | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3.5 | 3.5 | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.6 | 3.8 | 3.8 |
| 3.6 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 2.2 | 3.1 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 3.7 | 3.8 |
| 4.1 | 4.1 | | 3.9 | 4.1 | 3.6 | 2.7 | 3.1 | 2.7 | 2.9 | 2.9 | 3.8 | 3.9 |
| 4.2 | 4.2 | | | 4.1 | | 3.6 | | 3.3 | | | 3.8 | 3.9 |
| 4.1 | 4.1 | | 3.9 | 4.0 | 3.9 | 4.0 | 4.2 | | 4.1 | | 4.2 | |
| 4.0 | 4.0 | | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.1 | | 4.2 | 4.1 | | |
| 4.9 | 4.8 | 4.9 | 4.9 | 4.8 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 5.0 | 4.9 | 4.9 | 5.0 |

Figura 6.5. Datos relativos al gráfico 6.5.

En los siguientes gráficos (Gráfico 6.5 y 6.6) vemos una disminución del grosor en las cuadernas 12 a 16 en estribor (Gráfico 6.5) y en las 16 a 18 en babor (Gráfico 6.6). La diferencia es que en estribor la anomalía ocurre en la segunda plancha y en babor en la zona de la regala, pero ambos están en la misma zona del barco.

Los valores señalados en las figuras 6.3, 6.4 y 6.5 se corresponden a la “Splash zone”, es la zona cercana a la línea de flotación, en esta línea el proceso de corrosión no se interrumpe por la acción del oxígeno, además la corrosión se acelera por la acción de los rayos del sol y el continuo cambio de zona húmeda a zona seca [1] [7] [8] [9].

La zona superior de la chapa del casco sufre mayores corrosiones debido a que el ambiente que le afecta es agresivo, esto se debe a la combinación de factores tales como: alto contenido de cloruros, oxígeno, minerales corrosivos, acción de las olas, recepción del agua salada en forma de spray, alta humedad relativa, evaporación y condensación del agua salada.

Ambler et al [5] estudió la influencia de la temperatura en la corrosión en Nigeria, y observó que la corrosión no crecía con las altas temperaturas, sino que los factores que tenían más efecto sobre ésta eran las variaciones de temperaturas, y el resto de factores tales como la humedad o la concentración de iones cloruro.

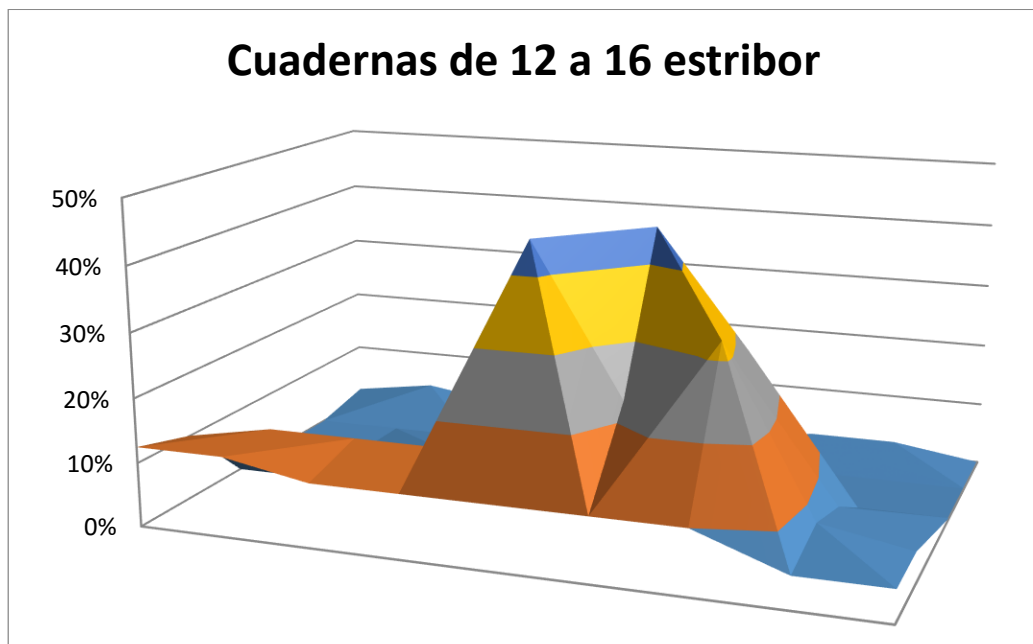


Gráfico 6.5. Corrosión ocurrida en las cuadernas 12 a 16 en la parte estribor del barco.

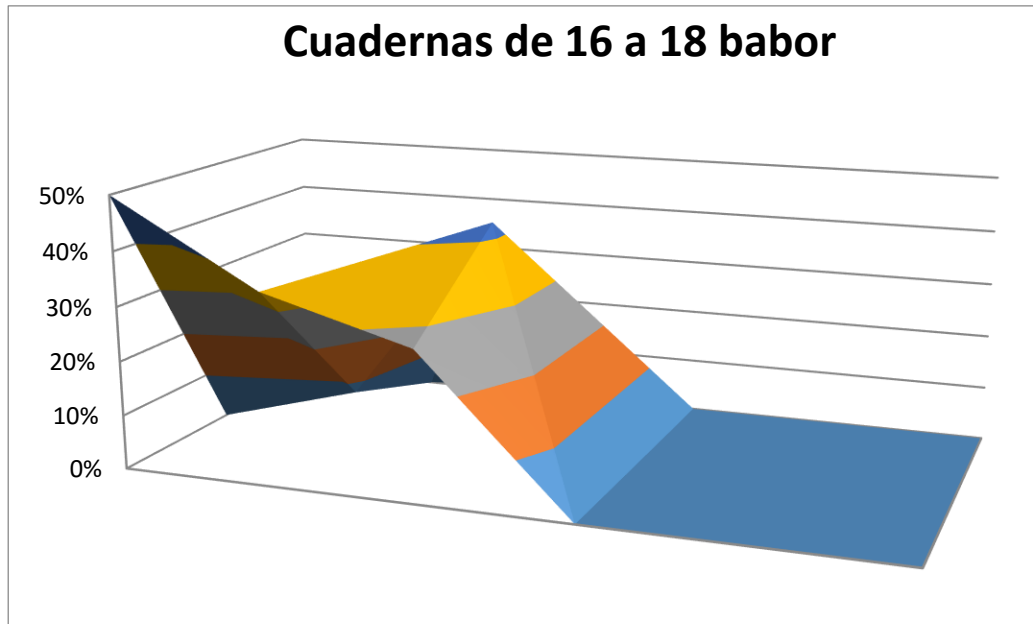


Gráfico 6.6. Corrosión ocurrida en las cuadernas 16 a 18 en la parte babor del barco.

Como se ve en babor la corrosión alcanza un 50% mientras que en estribor el valor máximo alcanzado en las dos puntas es del 45%. Se observa un valor menor en estribor, pero una coincidencia en las zonas de corrosiones en ambos lados del barco.

Melchers et al [6] realizó un estudio probabilístico y estableció que el efecto de la marea es un factor determinante a la hora de la pérdida de masa de la chapa del casco y de su posterior picadura.

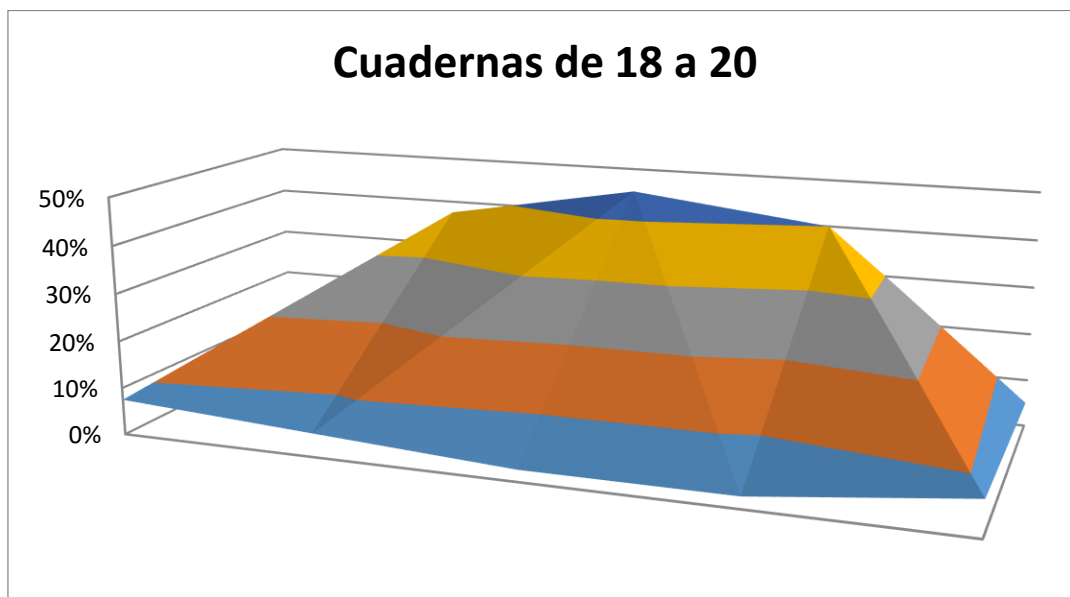


Gráfico 6.7. Gráfico de porcentaje de corrosión en las cuadernas 18 a 20 en el lado estribor.

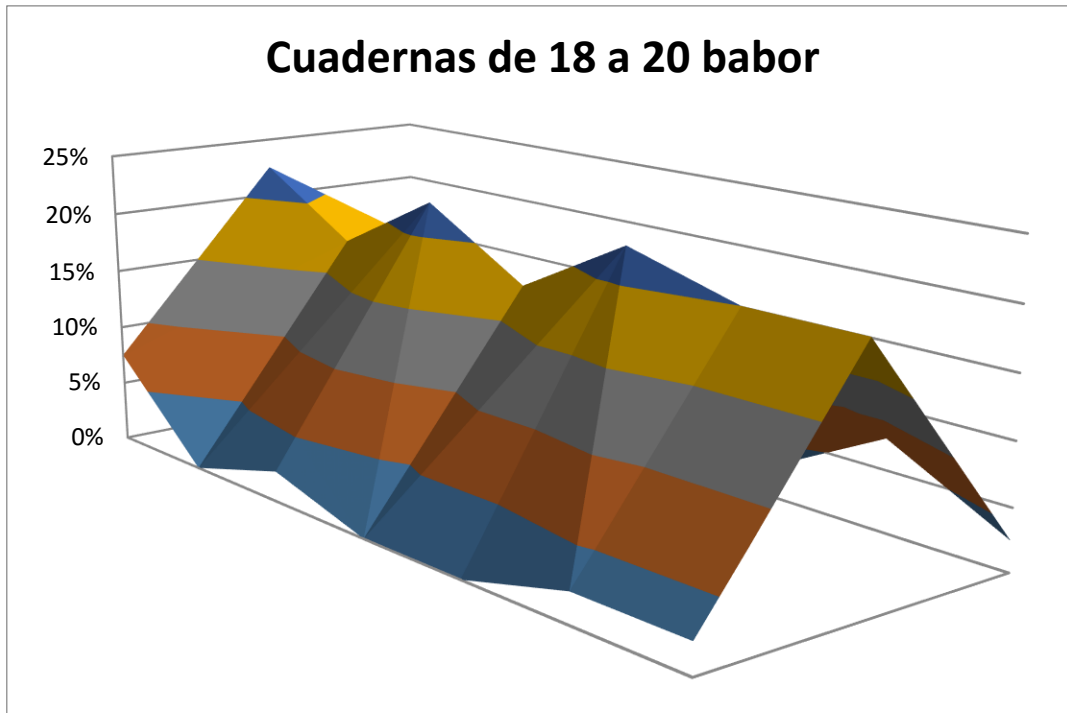
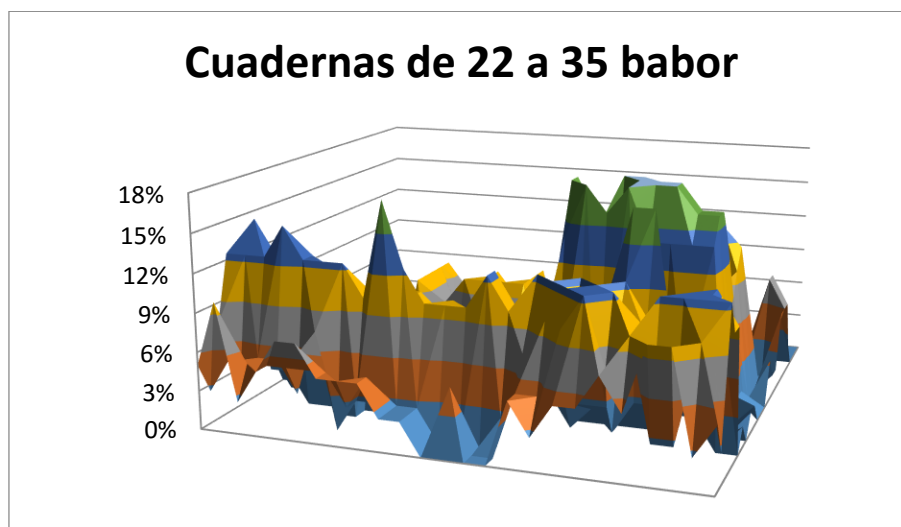


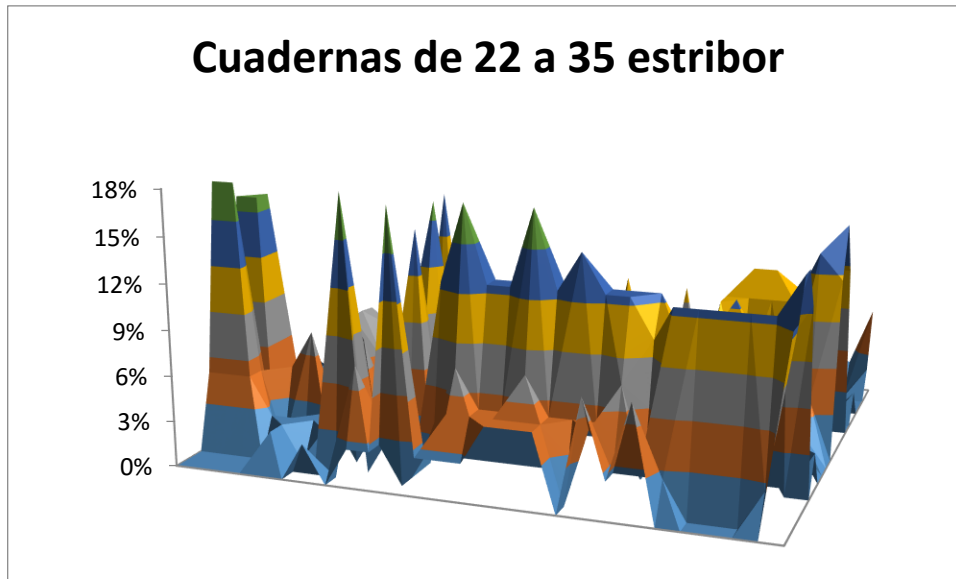
Gráfico 6.8. Gráfico de porcentaje de corrosión en las cuadernas 18 a 20 en el lado babor.

Si observamos la corrosión ocurrida en babor y estribor, observamos en los gráficos 6.7 y 6.8 que el valor máximo de corrosión está en estribor, pero se sigue observando que ocurre la corrosión en los mismos lados del barco.

Entre las cuadernas 22 a 35 observamos que este barco no tiene daños significativos en ninguna de las dos bandas. Como podemos deducir que las corrosiones en el casco ocurren de forma paralela en ambos lados del barco.

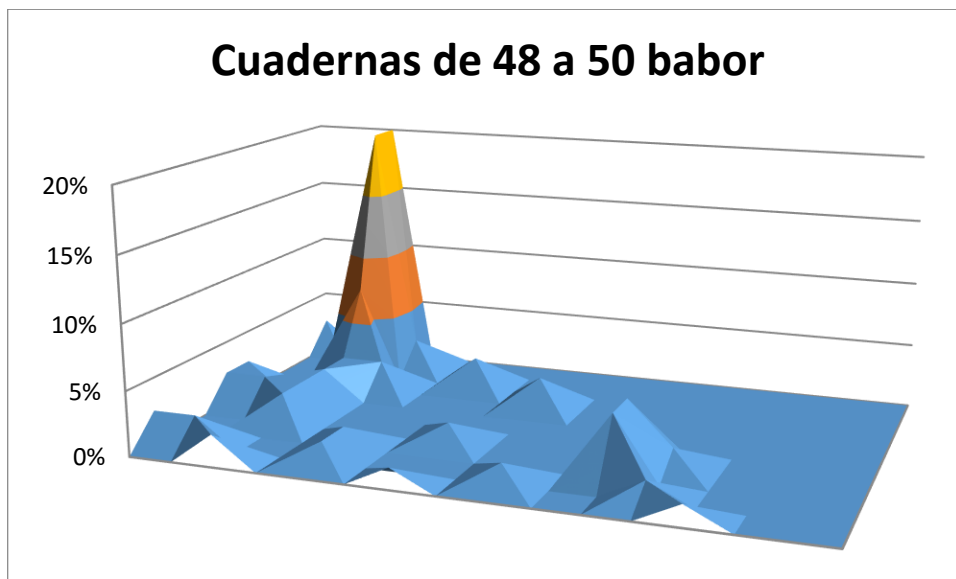


Gráfica 6.9. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 22 a 35 en la banda de babor.

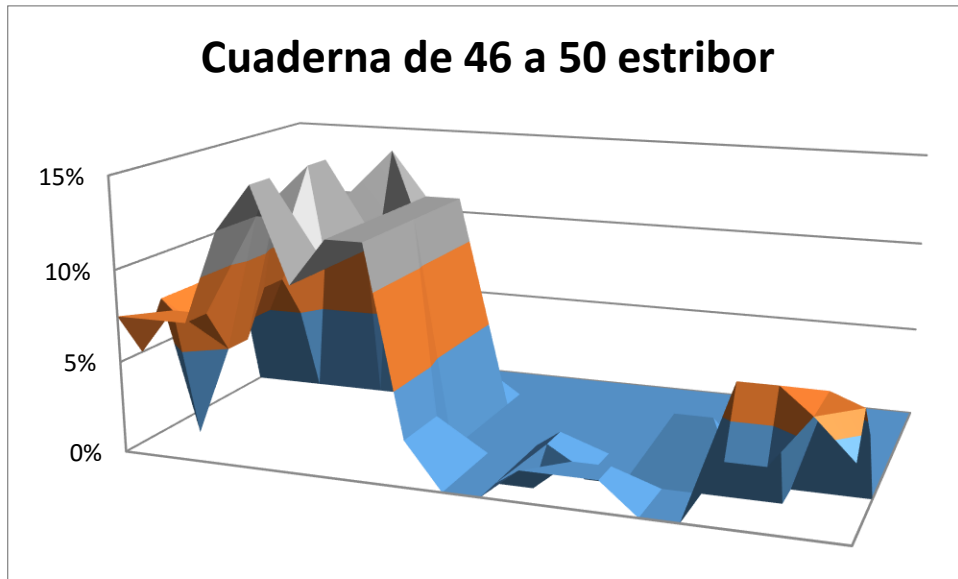


Gráfica 6.10. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 22 a 35 en la banda de estribor.

Como se observa en los gráficos 6.9 y 6.10 de las cuadernas que componen la parte media del barco (22 a 35) los valores de corrosión no superan el 20%. A pesar de ser ésta la parte menos dañada se observa también que la banda de babor tiene un mayor valor medio en porcentaje es de la banda de estribor es 2,7% mientras que en babor es de 3,88%. Los valores medios no son valores alarmantes, pero se ve una variación significativa dependiendo de la banda a evaluar.

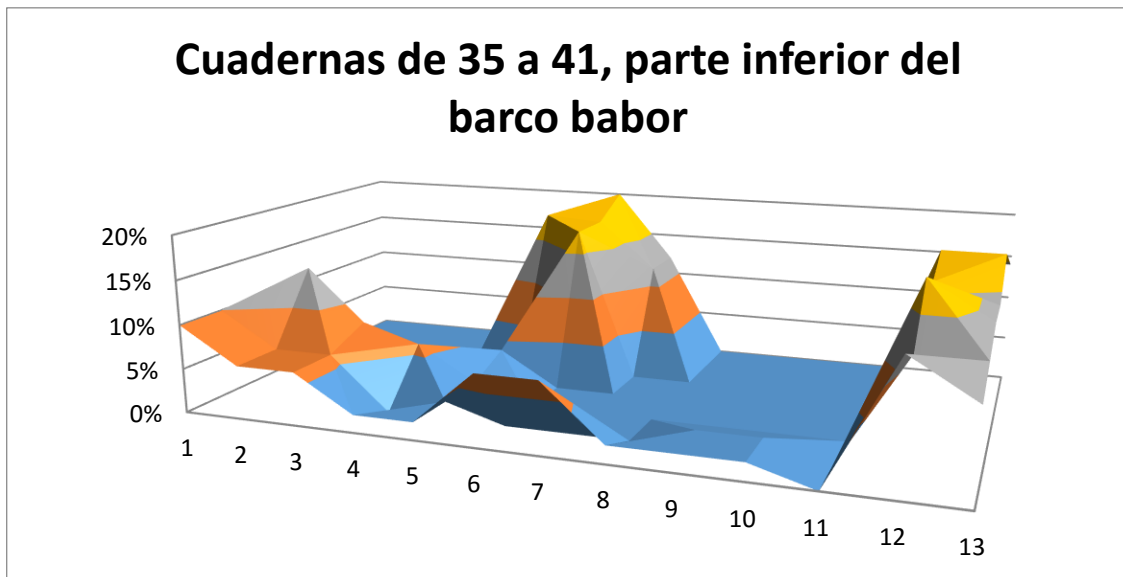


Gráfica 6.11. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 48 a 50 en la banda de babor.

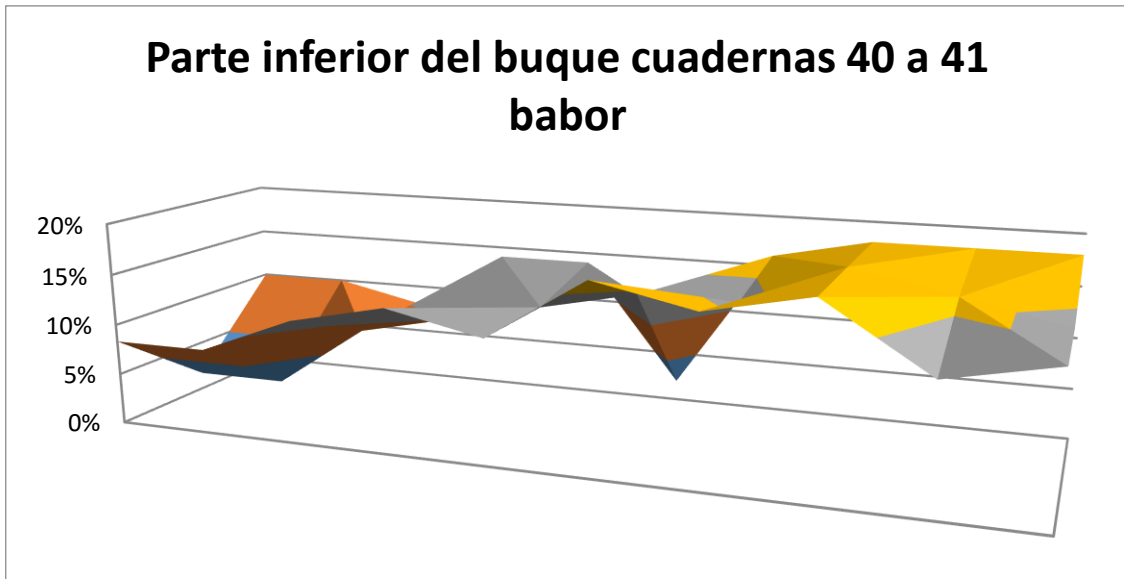


Gráfica 6.12. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 46 a 50 en la banda de babor.

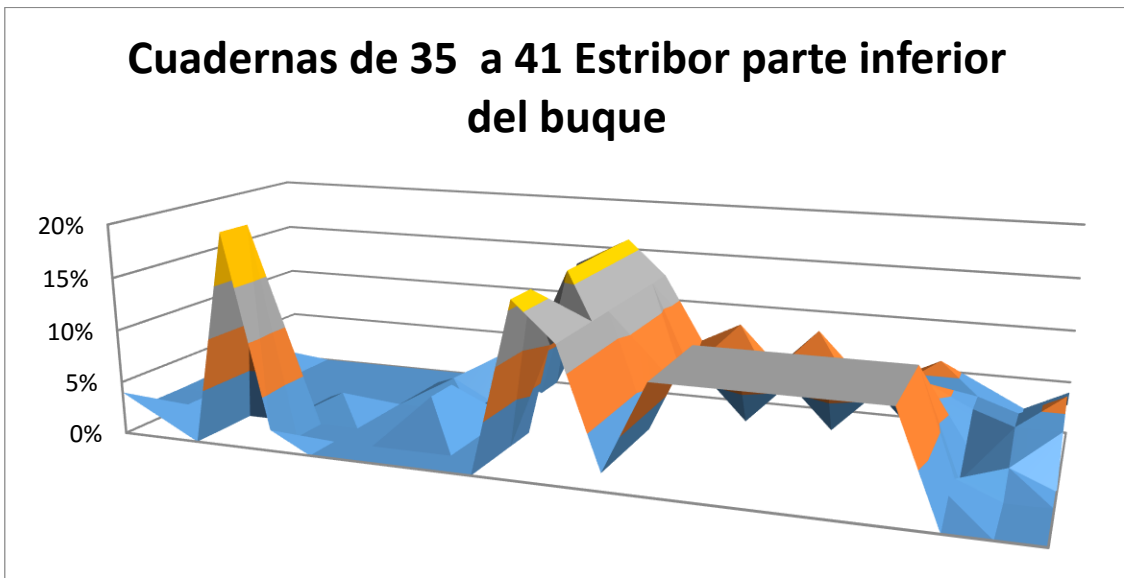
En proa entre las cuadernas 40 y 41 en la zona inferior del barco los valores son tan pequeños que el procedimiento de inspección no ha podido detectar el grosor de la chapa, lo que sigue indicando que en la misma zona del barco tanto en estribor como en babor la corrosión se comporta de igual forma, aunque en este caso se observe que hay una parte en la que la corrosión crece.



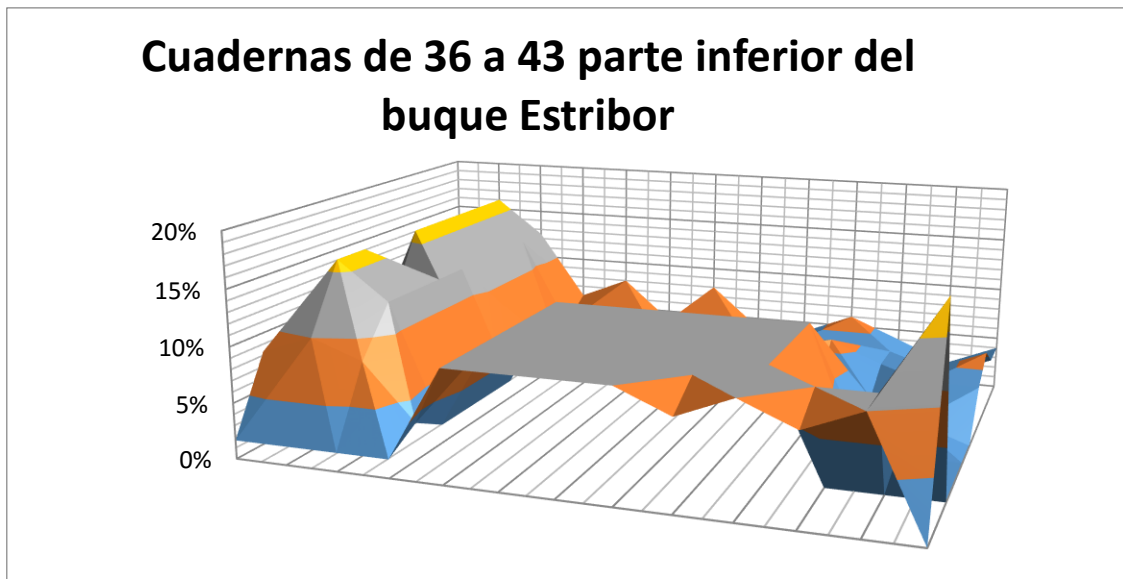
Gráfica 6.13. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 31 a 41 parte inferior del barco en la banda de babor.



Gráfica 6.14. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 40 a 41 parte inferior del barco en la banda de babor.



Gráfica 6.15. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 35 a 41 parte inferior del barco en la banda de estribor.



Gráfica 6.16. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 36 a 43 parte inferior del barco en la banda de estribor.

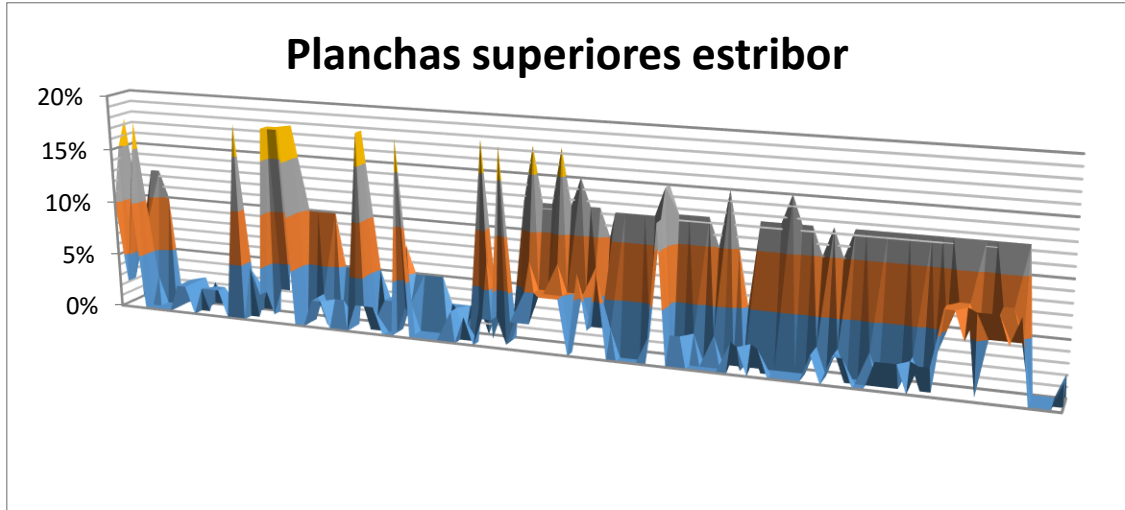
La parte inferior del barco está continuamente sumergida, la composición y temperatura del agua cambia según la zona en la que se encuentre navegando el barco. Tanto el pH, como la composición química del agua, el nivel de oxígeno y la temperatura son factores determinantes en la aceleración de la corrosión. La actividad del barco también influye en ésta, si el barco está continuamente atracado será más fácil que se encuentre corrosión en él, así como las adherencias de animales marinos en la parte baja del barco (moluscos, algas, etc.).

La parte inferior en general está en buen estado, pero en la proa presenta daños, esta diferencia se debe a que el buque sufrió un golpe y le hicieron una reparación sin tener en cuenta la diferente composición de material, la soldadura y el recubrimiento adecuado a realizar. La razón por la que en la parte inferior del buque (parte sumergida) se presentan menores valores de corrosión es debido al porcentaje de nivel de oxígeno disuelto en el agua [10]. Este nivel decrece significativamente con la profundidad de agua y es por ello que estas partes del buque presentan menos corrosiones que otras más expuestas.

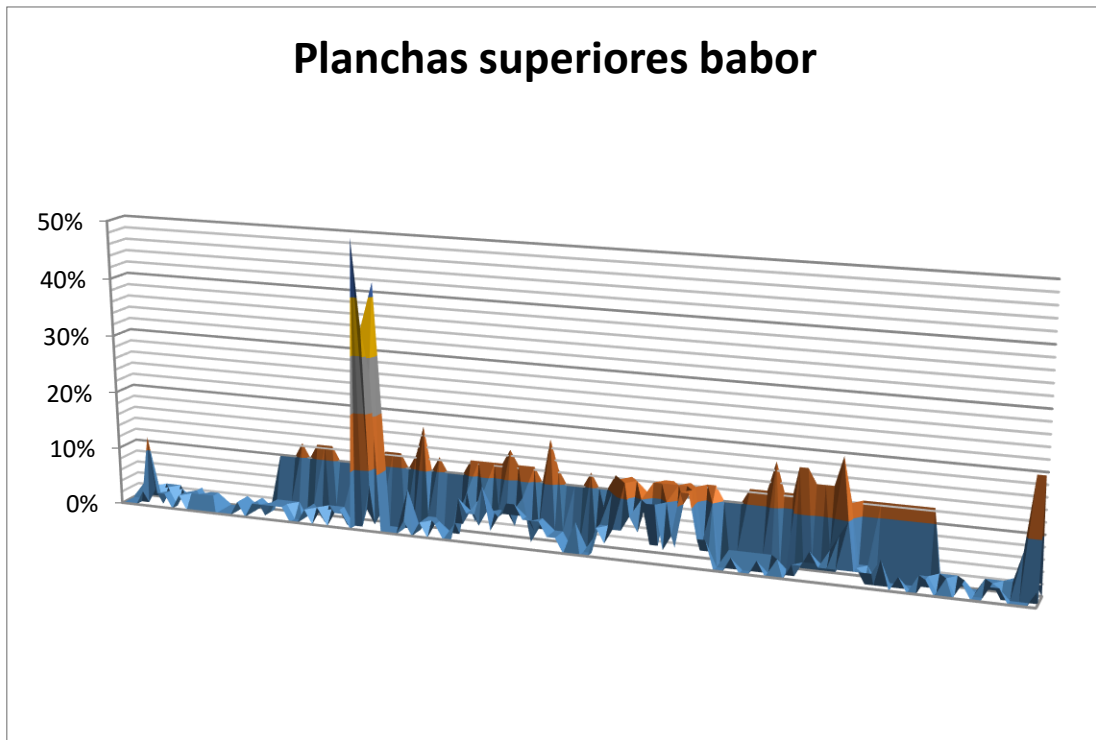
De esta forma podemos llegar a la conclusión que el casco en cuestión de corrosión se comporta de igual forma en babor y en estribor sin depender del lado que utilice habitualmente para atracar, a pesar de que se vea un pequeño

aumento de la corrosión comparando porcentajes (en la banda de babor existe un valor por encima del 40%).

Un factor a tener en cuenta cuando se diseña el barco es la forma. Mackay et al [11] comprobaron que la forma y los refuerzos de una superficie sumergida es determinante para el desarrollo de la corrosión.



Gráfica 6.17. Gráfico de porcentajes de corrosión en las planchas superiores estribor.



Gráfica 6.18. Gráfico de porcentajes de corrosión en las planchas superiores babor.

Si se comparan los gráficos de la plancha superior (6.17 y 6.18) se observa que en la banda de babor los porcentajes son más altos en la popa del barco, llegando a alcanzar un valor de 48% en uno de sus picos. A pesar de tener algunos mayores en la banda de babor que en la banda de estribor la media de los valores se aproxima en ambos casos al 4,6%.

Esta parte del barco es la que está sometida a un ambiente más agresivo debido a las acciones propias del barco (navegación), se encuentra salpicada por el agua del mar, así como cambios de temperatura.

6.3 Sumario

La capa protectora anticorrosiva debe ser aplicada en las mejores condiciones posibles:

- Limpieza.
- Óptimo preparado superficial.
- Condiciones de humedad y temperatura adecuadas para la aplicación del revestimiento.

El fallo de la protección en este caso se ha debido a la falta de mantenimiento, a respetar a los intervalos para volver a realizar el recubrimiento. Otro factor importante ha sido que la protección se ha realizado sin acondicionar un ambiente adecuado para la aplicación de la capa protectora. Cuando se realizó la aplicación de dicha capa había una temperatura media de 30° y una humedad relativa del 80%. Además de estos factores influye el ambiente marino en que se realizó la imprimación

Los daños en el casco del buque son numerosos y suficientes para considerar una nueva aplicación de la capa protectora, además de una reparación de las zonas en las que haya un mayor porcentaje de corrosión y se encuentren más dañadas. Estas serían:

Babor

Entre las cuadernas 18 a 21. Se observan porcentajes cercanos al 25%, y en general una zona con bastantes daños y corrosiones, como se puede observar en el gráfico 6.19.

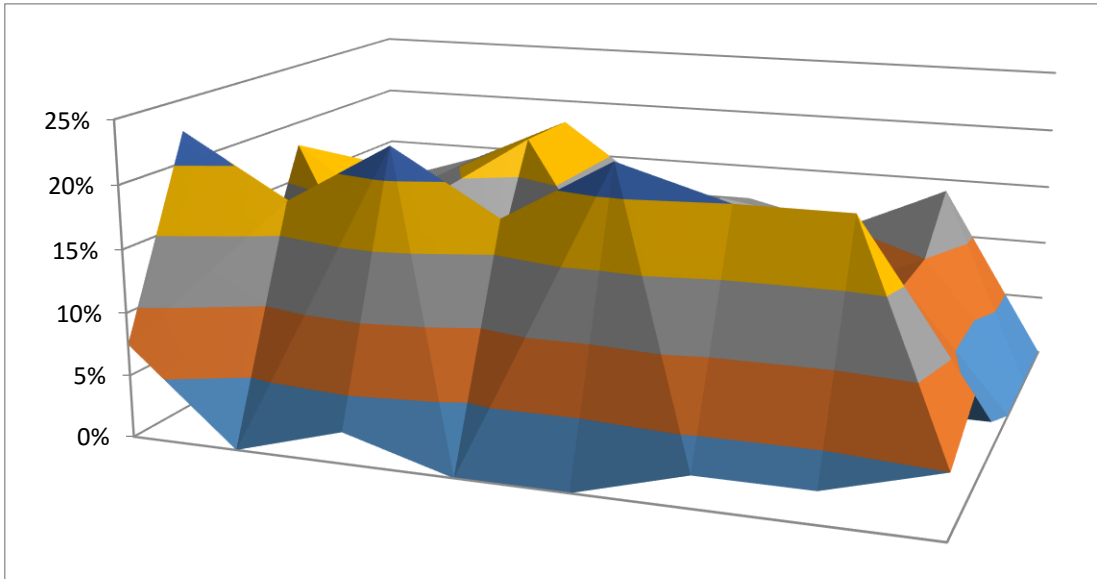


Gráfico 6.19. Gráfico de porcentajes de corrosión en las cuadernas 18 a 21 en la banda de babor.

Entre las cuadernas 16 y 18 también se deberán realizar reparaciones debido al mal estado de la parte alta. Esta parte sirve como protección de la tripulación y de la carga, debido a esto debe estar en perfecto estado.

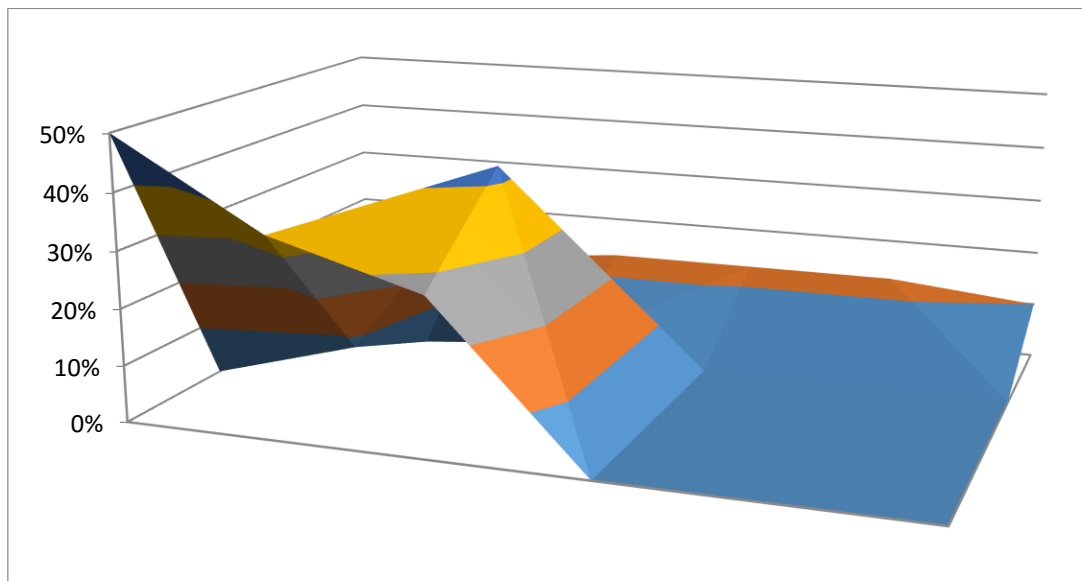


Gráfico 6.19. Gráfico de porcentajes de corrosión en las cuadernas 16 a 18 en la banda de babor.

6.4 Bibliografía

- [1] P.A. Sorensen, S. Kiil, K. Dam-Johansen, C.E. Weinell (2009). *Anticorrosive coatings: a review*. J. Coat. Technol. Res 6 (2) 135-176.
- [2] C. Guedes, Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang (2009). *Influence of environmental on corrosion of ship structures in marine atmosphere*. Corrosion Science 51 2014-2026.
- [3] R. E. Melchers (2003). *Probabilistic models for corrosion in structural reliability assessment – Part 2: models based on mechanics*. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering 125 (4) 272-280.
- [4] R.E. Melchers, R.J. Jeffrey (2008). *Probabilistic models for steel corrosion loss and pitting of marine infrastructure*. Reliability Engineering and System Safety 93 423–432.
- [5] H.R. Ambler, A.A. Bain (1995). *Corrosion of metals in the Tropics*. Journal of Applied Chemistry 5 437-467-
- [6] R.E. Melchers, M. Ahammed, R. Jeffrey, G. Simundic (2010). *Statistical characterization of surfaces of corroded steel plates*. Marine Structures Volume 23, Issue 3, Pages 274–287.
- [7] B. S. Skerry, C. H. Simpson (1993). *Corrosion and Weathering of Paints for Atmospheric Corrosion Control*. Corrosion: August 1993, Vol. 49, No. 8, pp. 663-674.
- [8] B. Appleman (1990). *Survey of Accelerated Test Methods for Anti-Corrosive Coating Performance*. J. Coat. Technol.. 62 57.
- [9] O.O. Knudsen, U. Steinsmo, M. Bjordal, S. Nijjer (2001). *Accelerated Testing: Correlation between Four Accelerated Tests and Five Years of Offshore Field Testing*. J. Protect. Coat. Linings, 52.
- [10] R. E. Melchers, B. B. Chernov (2010). *Corrosion loss of mild steel in high temperature hard freshwater*. Corrosion Science 52 449–454.
- [11] J. R. MacKay, M. J. Smith, F. Keulen, T. N. Bosman, N. G. Pegg (2010). *Experimental investigation of the strength and stability of submarine pressure hulls with and without artificial corrosion damage*. Marine Structures 23 339–359.

Capítulo 7. Caso C. Estudio de la corrosión en cubierta

Capítulo 7. Caso C. Estudio de la corrosión en cubierta

7.1 Introducción

Estos datos están extraídos de un informe que se realizó a dicho buque con intención de evaluar el estado de su chapa. Se realizó una inspección visual de las soldaduras y posteriormente se realizó la inspección con ultrasonidos para evaluar los espesores de las chapas.

El buque a tratar desplaza 303 toneladas estándar, tiene una eslora de 57,4 metros, una manga de 7,6 metros y un calado de 2,7 metros. Su potencia es de 8045 CV y alcanza una velocidad de 31 nudos. Su zona habitual de navegación es el Océano Atlántico.

7.2 Previo

Para conocer el espesor de la chapa se ha utilizado la técnica de ultrasonidos. Los ultrasonidos son ondas sonoras cuya frecuencia es mayor de 20000 Hz. De esta forma se puede conocer el estado de salubridad de la chapa de la cubierta, sabiendo su espesor inicial y comparándolo con el valor actual.

Para ello se ha empleado un medidor de espesores de la casa PCE Ibérica:

- Modelo PT-UTGM3-E Advanced.
- Medición por Eco Múltiple, puede medir desde 2,5 a 60 mm.
- Para realizar la medida no es necesario quitar la pintura.
- Precisión es de $\pm 0,03$ mm.
- Velocidad de ultrasonido de 1250 a 9999 m/s.
- Normativa ASTM E797.

En el siguiente gráfico (7.1) podemos observar el estado global de todas las cubiertas del buque expuestas a la intemperie.

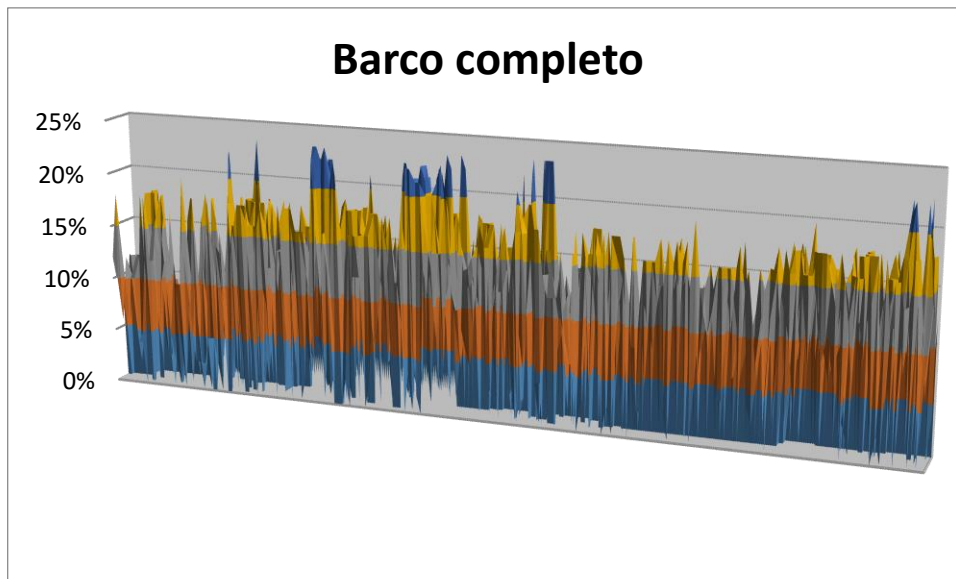


Gráfico 7.1. Gráfico de porcentajes de corrosión del barco completo

En el gráfico 7.1 se observa que los valores de corrosiones más altos no llegan el 25%. Esto quiere decir que la chapa del barco en su conjunto no ha superado el 25% de pérdida de material. La media de los valores de corrosión de la cubierta es de un 12%.

La corrosión en cubierta está influenciada por la lluvia y la acumulación de agua de mar [1]. En esta parte del barco el factor medioambiental que más influencia tiene en la aceleración de la corrosión es la temperatura. La cubierta está sometida a cambios de temperatura durante las horas del día y de la noche, esta temperatura condiciona el proceso corrosivo del agua que se acumula durante el proceso de navegación del barco.

7.3 Inspección visual

Se realiza una inspección visual al 100% de las zonas dónde apoyan los soportes interiores de los picaderos que soportan el buque. Las soldaduras que se han inspeccionado son las siguientes:

- Preparación de bordes
- Acoplamiento
- Acabado de soldadura
- Sobre espesor
- Porosidad superficial
- Mordeduras
- Cebados de Arco

- Raíz cóncava
- Fisuras
- Falta de penetración
- Falta de fusión

Resultando la inspección satisfactoria sin necesidad de reparación.

Inspección por ultrasonidos. Control de espesores

Se inspecciona la zona de cubierta con un palpador tipo DA-301 tamaño 10 mm y frecuencia 5 MHz. Se mide la cubierta del buque con catas realizadas cada 300 mm aproximadamente. En la tabla adjunta se detallan los valores ordenados de Proa a Popa y de Babor a Estribor.

7.3.1 Puente abierto

EN: 4mm

| | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| - | 4,7 | 4,4 | 4,2 | - |
| - | 4,7 | 4,4 | 4,5 | - |
| - | 4,3 | 4,3 | 4,3 | - |
| 4,1 | 4,4 | 4,5 | 4,5 | 4,2 |
| 4,2 | 4,5 | 4,1 | 4,6 | 3,8 |

Tabla. 7.1. Tabla de valores de espesor de la chapa

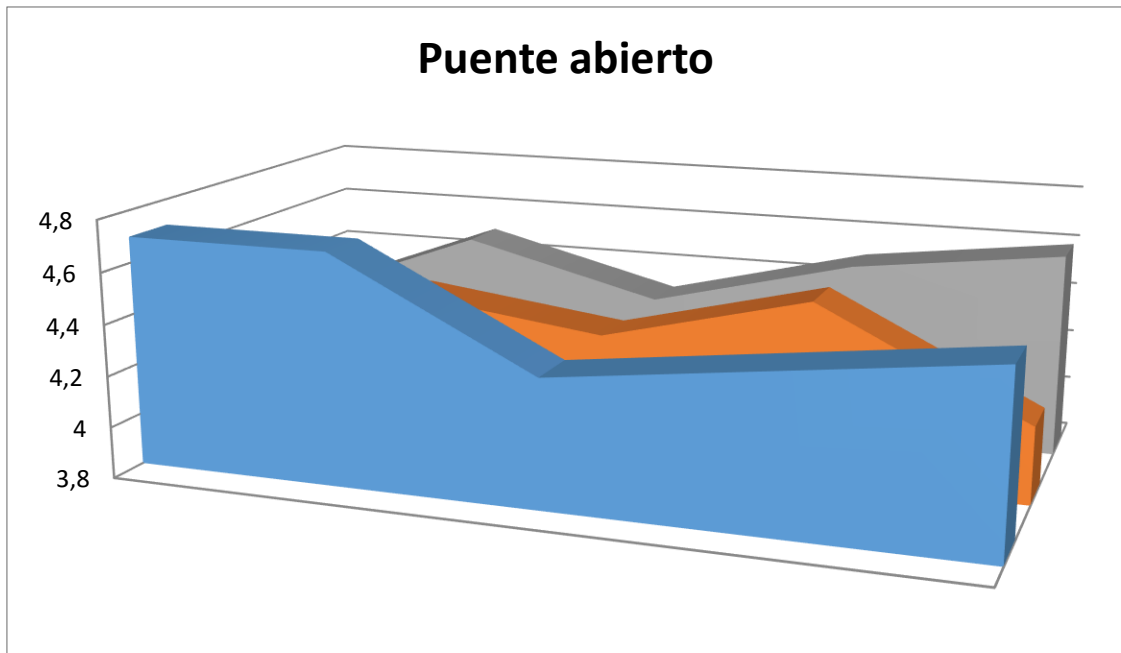


Gráfico 7.2. Mediciones del puente abierto.

En el gráfico 7.2 se puede observar el espesor de la chapa medido. Se puede ver que no conserva que la chapa no está entera en ninguna parte de esta zona, con lo cual la capa protectora no ha cumplido su cometido.

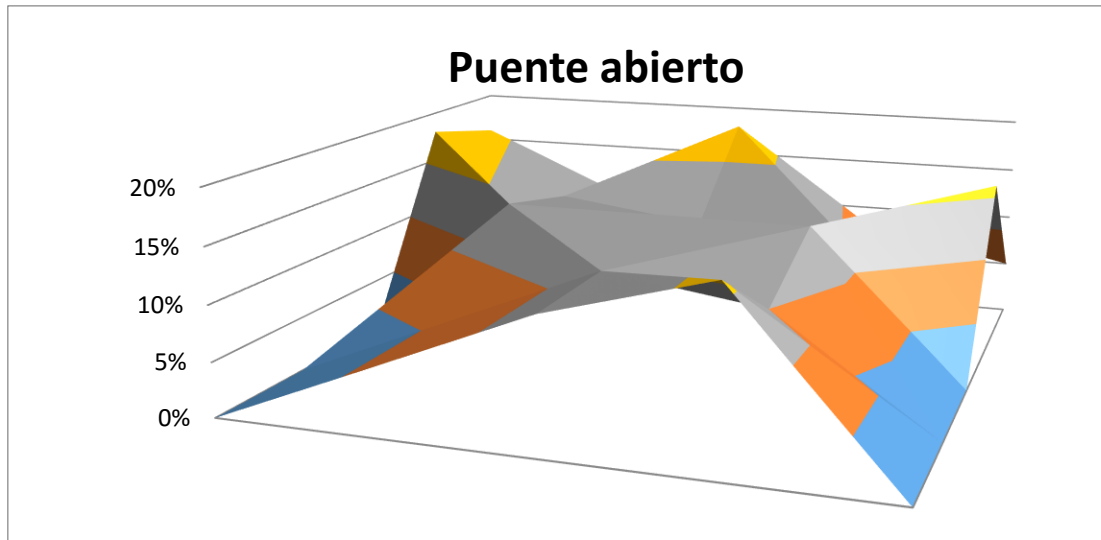


Gráfico 7.3. Porcentajes resultado de las mediciones en el puente abierto.

En el gráfico se puede ver el porcentaje de pérdida de material en el puente abierto. El valor máximo de corrosión es de un 18% y la media de los valores un 12%. Esta zona está situada en proa y sufre las inclemencias meteorológicas propias de la navegación. En el tipo de protección corrosiva hay que tener en cuenta el ambiente al que estará sometido el material en cuestión. Sorensen et al [2] determina diferentes exposiciones. La que afecta a este caso es la atmosférica en ambiente marino con zona de salpicadura. Esta parte del barco está sometida a la radiación ultravioleta, calor, sal y distintas concentraciones de gases.

7.3.2 Techo puente

EN: 4 mm

Una chapa de 8 mm en la proa hacia babor

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 8 | 4,7 | 4,6 | 4,6 | 4,6 | 4,4 |
| 8,2 | 4,5 | 4,4 | 4,6 | 4,4 | 4,5 |
| 4,6 | 4,7 | 4,5 | 4,5 | 4,6 | 4,4 |
| 4,7 | 4,5 | 4,5 | 4,4 | 4,7 | 4,4 |
| 4,6 | 4,8 | 4,9 | 4,4 | 3,9 | 4,4 |

Tabla 7.2. Tabla de valores de espesor de la chapa

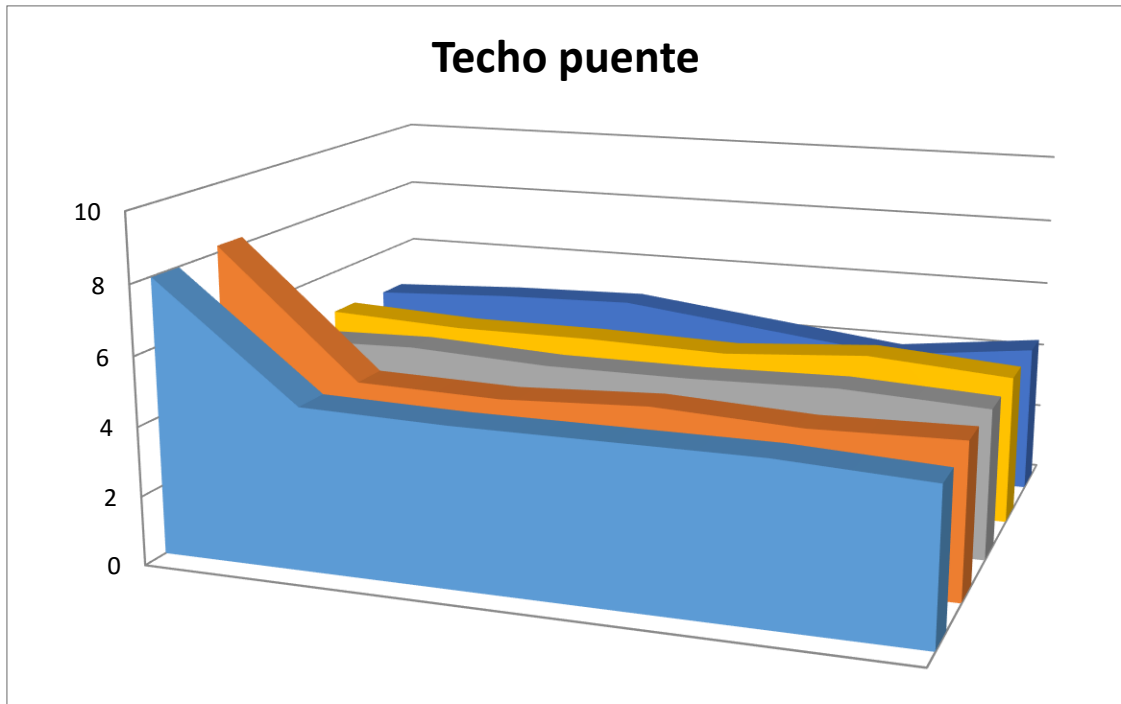


Gráfico 7.4. Mediciones de espesor realizadas en el techo puente.

En esta serie de mediciones se realiza la comprobación del estado de una boca de hombre, el material de ésta está en perfecto estado. Se observa que la chapa tiene un grosor uniforme alrededor de esta superficie.

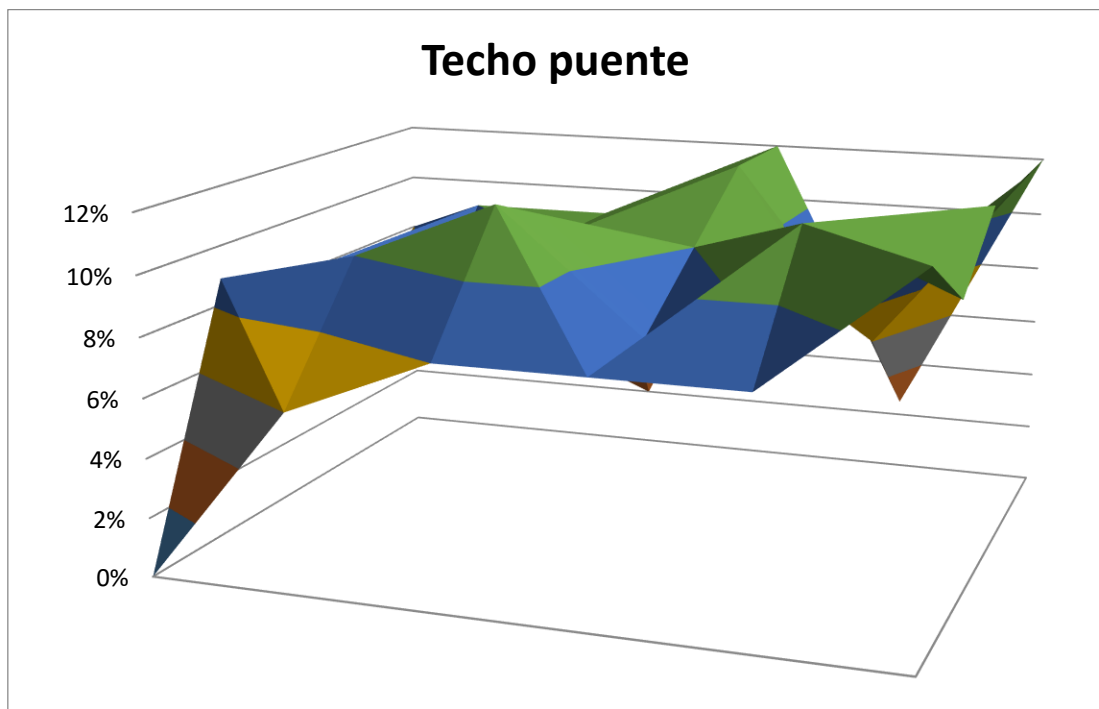


Gráfico 7.5. Porcentajes de espesor de las medidas realizadas en el techo puente.

El techo del puente es la parte que más cambios de temperatura tiene, al ser la parte alta, pero sin embargo como se ha observado es una de las partes con menos corrosiones, llegando a un valor máximo de 12% de corrosión en su chapa y el valor medio de los porcentajes de corrosión se sitúa en torno a un 8%.

Esta parte no acumula agua salada y la llegada de ésta se hace más difícil al estar más alta que las cubiertas inferiores. Es la parte con menor media de corrosión. Esto se debe a que no recibe gran cantidad de salpicaduras de agua salada, esto disminuye el riesgo de la aparición de corrosión y es más fácil la preparación de la superficie antes de la aplicación de la capa protectora [1] y [2].

7.3.3 Cubierta puente

EN: 4 mm

Valores ordenados de Babor a Estribor y de Popa y Proa

EN boca de hombre (BH): 10 mm

| | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----------|------------|-----|-----|-----|-----|
| 4,1 | 4,8 | 3,8 | 4,1 | 4,4 | 4,1 | 4,3 | 4,5 | 4,1 | 4,2 |
| 4,3 | 4,0 | 4,4 | 4,0 | 9,9 BH | 10,3 BH | 4,1 | 4,1 | 4,3 | 4,1 |
| 4,3 | 4,1 | 4,0 | 4,0 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 4,1 | 4,2 | 4,5 |
| 4,8 | 4,4 | 4,3 | 4,6 | 4,1 | 4,0 | 3,8 | 4,3 | 3,8 | 4,0 |
| 4,4 | 4,4 | 4,3 | 4,2 | 4,5 | 4,6 | 4,9 | 4,3 | 4,4 | 4,2 |
| 3,8 | 3,8 | 3,9 | 4,4 | 4,1 | 4,1 | 3,9 | 3,7 | 3,8 | 3,7 |
| 4,4 | 4,5 | 4,3 | 4,2 | 3,9 | 3,6 | 3,9 | 3,7 | 4,0 | 3,8 |
| 4,5 | 4,4 | 4,4 | 4,7 | 4,5 | 3,9 | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 3,9 |
| 3,8 | 3,8 | 4,0 | 3,9 | 3,8 | 4,5 | 3,7 | 3,7 | 3,9 | 3,9 |
| 4,1 | 3,9 | 4,4 | 4,0 | 4,0 | 3,8 | 3,9 | 3,8 | 3,9 | 3,9 |
| 3,7 | 3,6 | 3,8 | 3,9 | 3,9 | 4,2 | 3,7 | 4,0 | 4,3 | 3,9 |
| 3,5 | 3,6 | 4,0 | 3,9 | 3,6 | 4,0 | 3,7 | 3,8 | 3,9 | 3,7 |
| 3,6 | 3,4 | 3,2 | 3,7 | 4,2 | 4,6 | 4,6 | 3,8 | 3,6 | 3,8 |
| 3,7 | 3,6 | 3,7 | 3,6 | 4,1 | 3,6 | 3,6 | 3,8 | 3,4 | 3,9 |
| 3,8 | 3,8 | 3,9 | 4,1 | 3,7 | 3,7 | 3,8 | 4,2 | 3,7 | 4,1 |

Tabla 7.3. Tabla de valores de espesor de la chapa

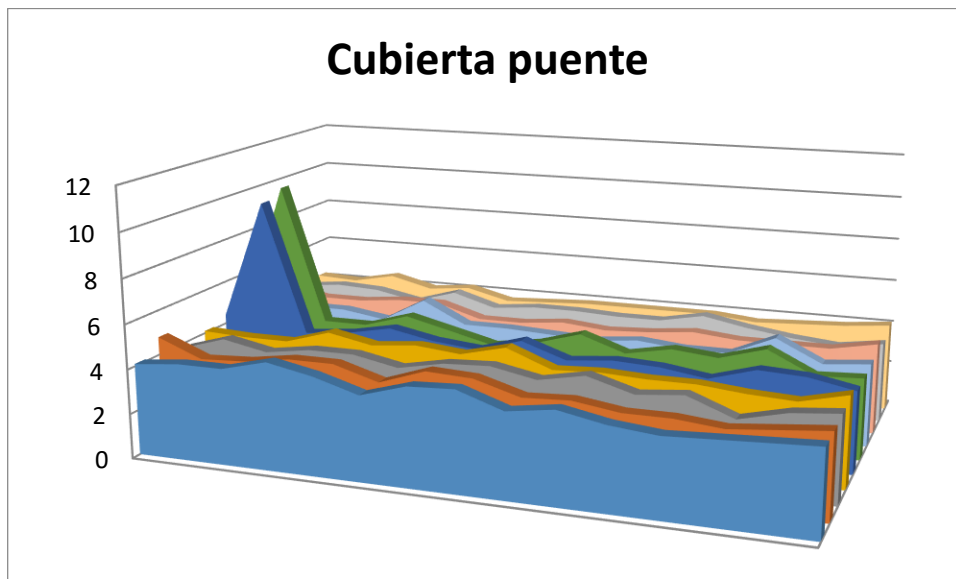


Gráfico 7.6. Mediciones de espesor realizadas en la cubierta puente.

El grosor de la chapa se observa uniforme. Los dos picos son dos bocas de hombre que también ha sido evaluadas.

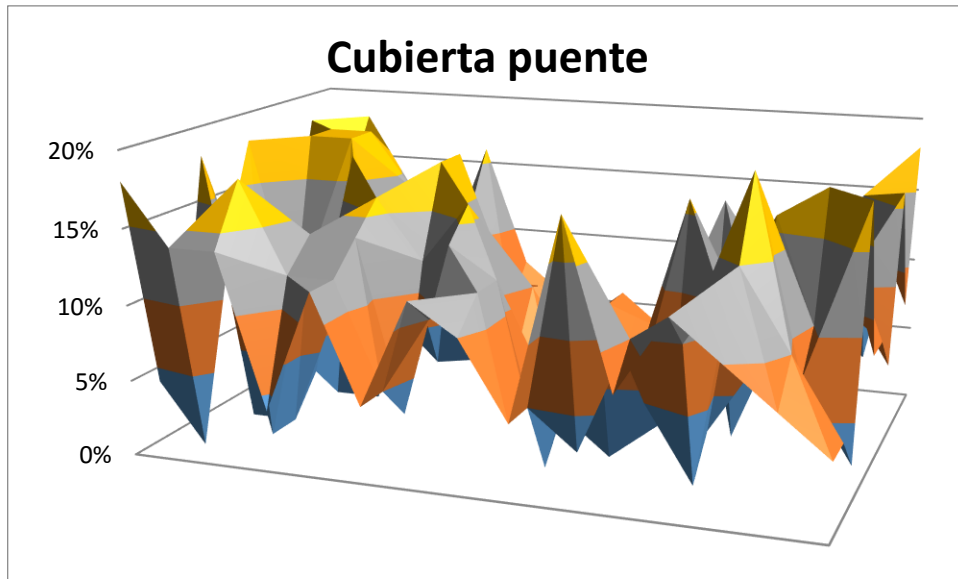


Gráfico 7.7. Porcentajes de las mediciones realizadas en la cubierta puente.

En esta parte del puente se observan corrosiones menores del 20% (la mayor es de un 18%) y la media de los valores está en un 8%. Si esta plancha no estuviese protegida en 6 meses en este ambiente tendríamos la superficie de la plancha corroída [3]. La cubierta del puente es la zona más alta del barco y situada más a proa. Esta es una de las partes más sometidas a los cambios de temperatura durante el día y a las inclemencias del tiempo, pero también es la parte en la se acumula menos agua del mar. Aunque tenga valores cercanos al 20%, la tendencia de las corrosiones es ser menores, de ahí que tenga un valor medio bajo.

Cubierta puente 2

EN: 4 mm

Valores ordenados de babor a estribor y de popa a proa

EN boca de hombre (BH): 10 mm

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|------------|
| 3,9 | 3,6 | 3,9 | 3,8 | 3,8 | 3,7 | 3,9 | 3,8 | 3,8 | 4,3 | 3,7 | 3,8 |
| 3,4 | 3,9 | 4,0 | 3,5 | 3,7 | 3,4 | 3,5 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | 3,8 | 3,5 |
| 3,6 | 3,9 | 3,9 | 3,8 | 3,8 | 3,7 | 3,5 | 3,6 | 3,6 | 4,0 | 3,6 | 3,6 |
| 3,7 | 3,8 | 4,0 | 4,1 | 4,4 | 4,1 | 4,1 | 3,9 | 3,9 | 4,4 | 9,6 BH | 10,3 BH |
| - | - | 3,8 | 3,5 | 3,6 | 4,2 | 3,6 | 3,7 | 3,7 | - | - | - |
| - | 4,0 | 3,9 | 3,8 | 3,7 | 3,7 | 3,6 | 3,8 | 3,8 | 4,1 | 3,8 | - |

Tabla 7.4. Tabla de valores de espesor de la chapa.

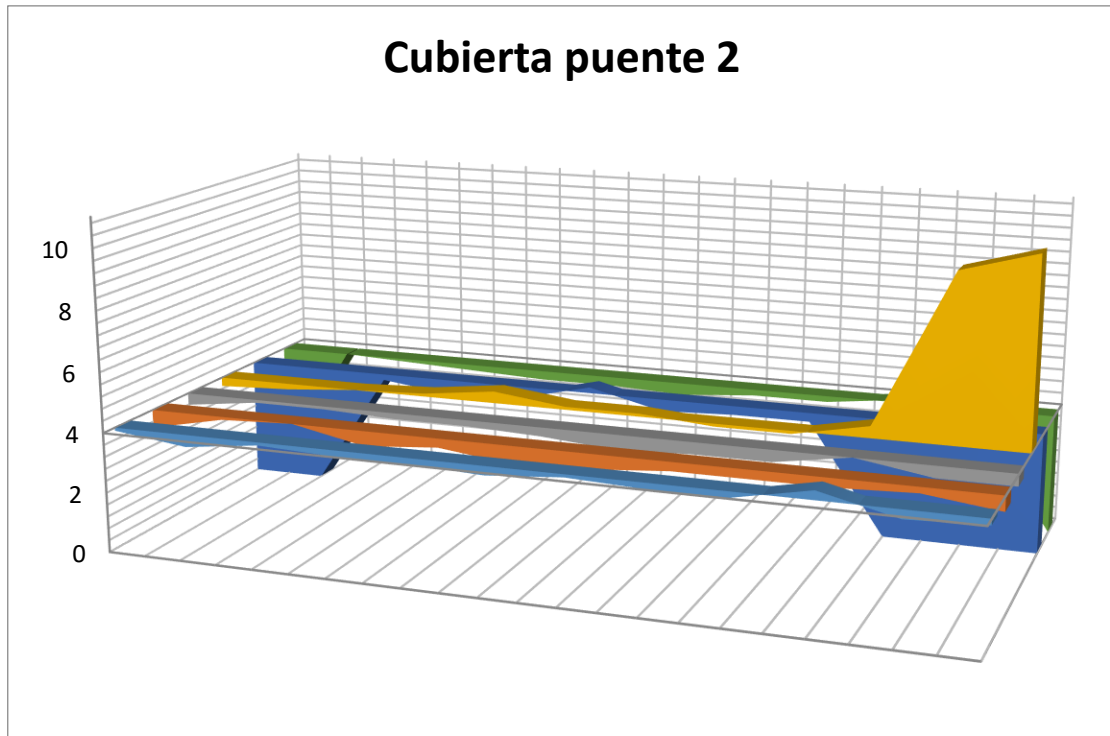


Gráfico 7.8. Mediciones de espesor en la cubierta puente, segundo tramo.

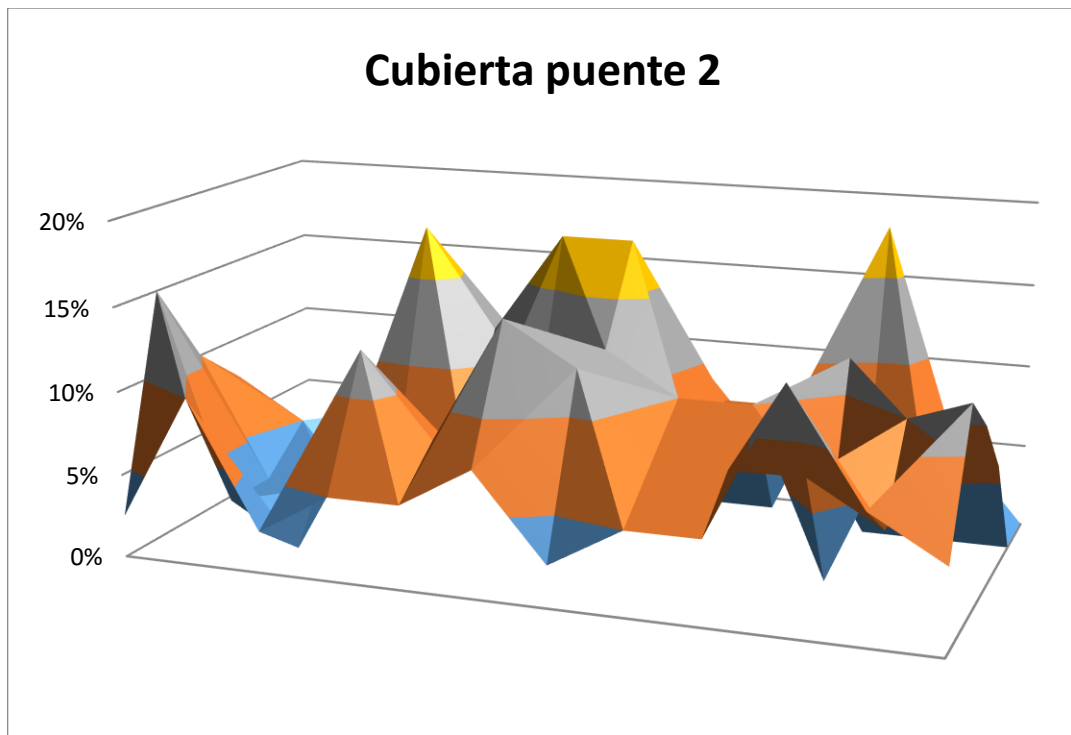


Gráfico 7.9. Porcentaje de las mediciones realizadas en la cubierta puente, segundo tramo.

En esta parte del barco el porcentaje más alto de corrosión es un 18%, pero en general se observa que la media del porcentaje de corrosión corresponde a un 8%, con lo que se puede concluir que en general presenta un buen estado. Esta es la segunda parte de la cubierta puente y se puede ver que la tónica general es la misma que en la anterior, teniendo valores muy parecidos.

7.3.4 Cubierta

Debido a la longitud de la cubierta, ésta se estudiará en pequeños tramos para poder evaluar la evolución de la corrosión en detalle.

EN: 4 mm

Valores ordenados de babor a estribor y de popa a proa

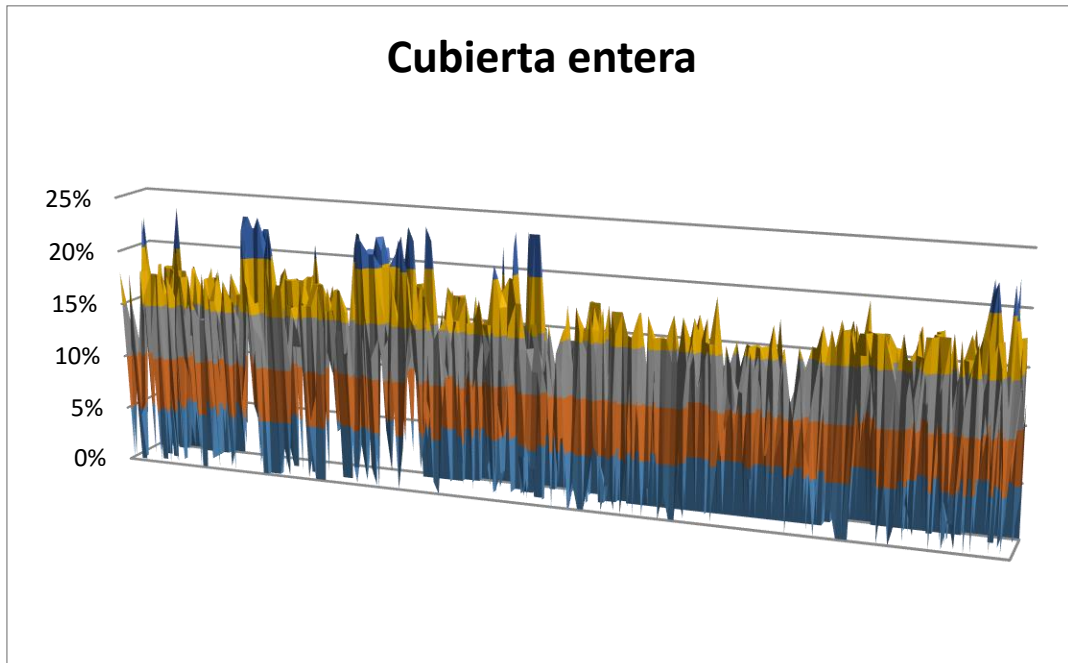


Gráfico 7.10. Porcentaje de las mediciones realizadas en toda la cubierta.

En el gráfico 7.10 muestra todos los valores de la cubierta ordenados de babor a estribor y de popa a proa. Como se observa los picos de corrosión (cercaos al 25%) están situados a popa, en la parte media la corrosión descende y llegando a proa se encuentra un nuevo crecimiento de la corrosión.

EN boca de hombre (BH): 10 mm

| Nº FILA | | | | | | | | | | | |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 1 | | 4,3 | 4 | 5,1 | 4,8 | 4,9 | 8,2 | 4,2 | 4,3 | 4,1 | |
| 2 | 5 | 5,2 | 4,6 | 4,5 | 8,1 | 4,8 | 4,5 | 6,2 | 4,1 | 4,2 | |
| 3 | 4,1 | 4 | 4 | 4 | 4,1 | 6,2 | 4,1 | 4 | 4,6 | 4,4 | |
| 4 | 8,6 | 4 | 4,1 | 4,2 | 4 | 4,2 | 4 | 5,1 | 4,1 | 4,1 | |
| 5 | 8,5 | 4,3 | 4,2 | 4,1 | 4,3 | 8,6 | 8,6 | 4,4 | 4,8 | 5,7 | |
| 6 | 4,2 | 4,2 | 5,3 | 4,3 | 5,4 | 4 | 4,3 | 4,1 | 4,1 | 4 | |
| 7 | 4,4 | 4,1 | 4 | 4,5 | 4,2 | 4 | 4,1 | 4,4 | 4,1 | 4 | |
| 8 | 5 | 4,1 | 4 | 4,1 | 4 | 4,2 | 4,1 | 4 | 4,1 | 4 | |
| 9 | 4,1 | 4,1 | 4,2 | 4,2 | 4 | 4,1 | 4,1 | 4,1 | 4 | 3,9 | |
| 10 | 4 | 4,6 | 4 | 4,2 | 4,1 | 4,1 | 6,1 | 4,3 | 4,6 | 3,8 | |
| 11 | 4,1 | 4 | 4,2 | 4 | 4 | 4,1 | 4,4 | 4,9 | 3,8 | 4,1 | |
| 12 | 4,5 | 4,2 | 6,3 | 4,5 | 4,3 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 4,1 | 4 | |
| 13 | 4,2 | 4,1 | 4,3 | 4,6 | 4,4 | 4,7 | 4,3 | 4,6 | 4,2 | 4 | |
| 14 | 4,1 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,2 | 4 | |
| 15 | 3,4 | 4,1 | 3,5 | 4,5 | 4,4 | 4,3 | 4,2 | 4,3 | 4,6 | 4,1 | |
| 16 | 4,2 | 4 | 4,4 | 4,5 | 4,1 | | | | | | |
| 17 | 4 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,5 | 4,6 | 4,2 | 4,4 | 4,1 | | |
| 18 | 4 | 4,3 | 4,6 | 3,8 | 4,3 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,6 | 4,5 | |
| 19 | 4,1 | 4,1 | 4,2 | 4,2 | 3,7 | 3,9 | 4,4 | 4,3 | 4,3 | 4,4 | |
| 20 | 4,2 | 4 | 4,1 | 4,5 | 4,2 | 4,5 | 4,3 | 4,5 | 4,4 | 4,5 | |

Tabla 7.5. Tabla de valores de espesor de la chapa

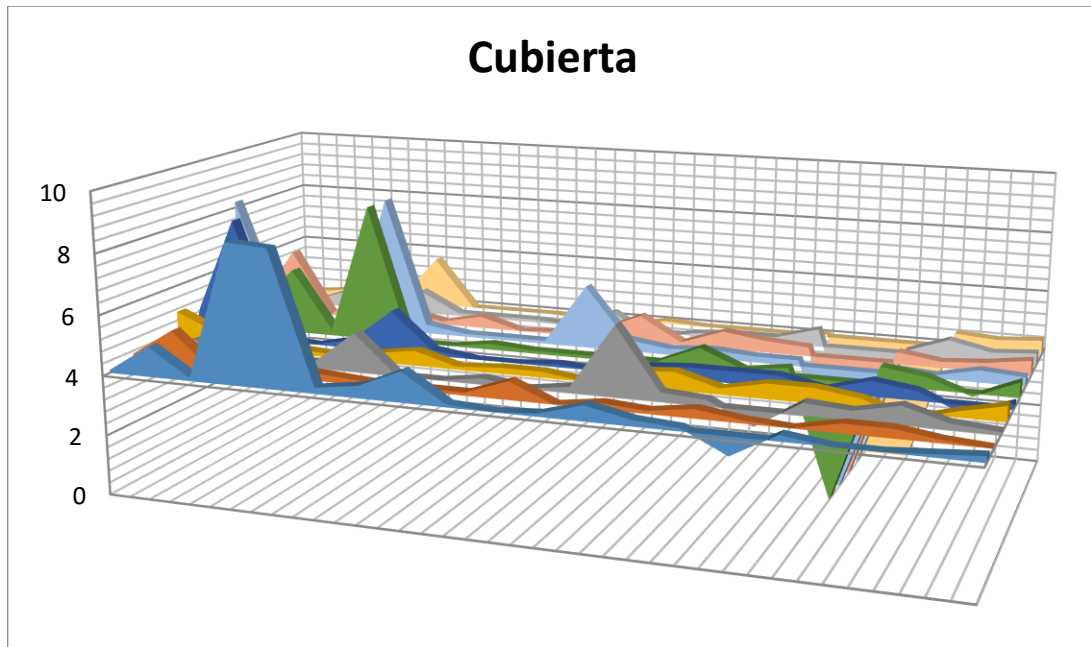


Gráfico 7.11. Mediciones de las planchas en la cubierta.

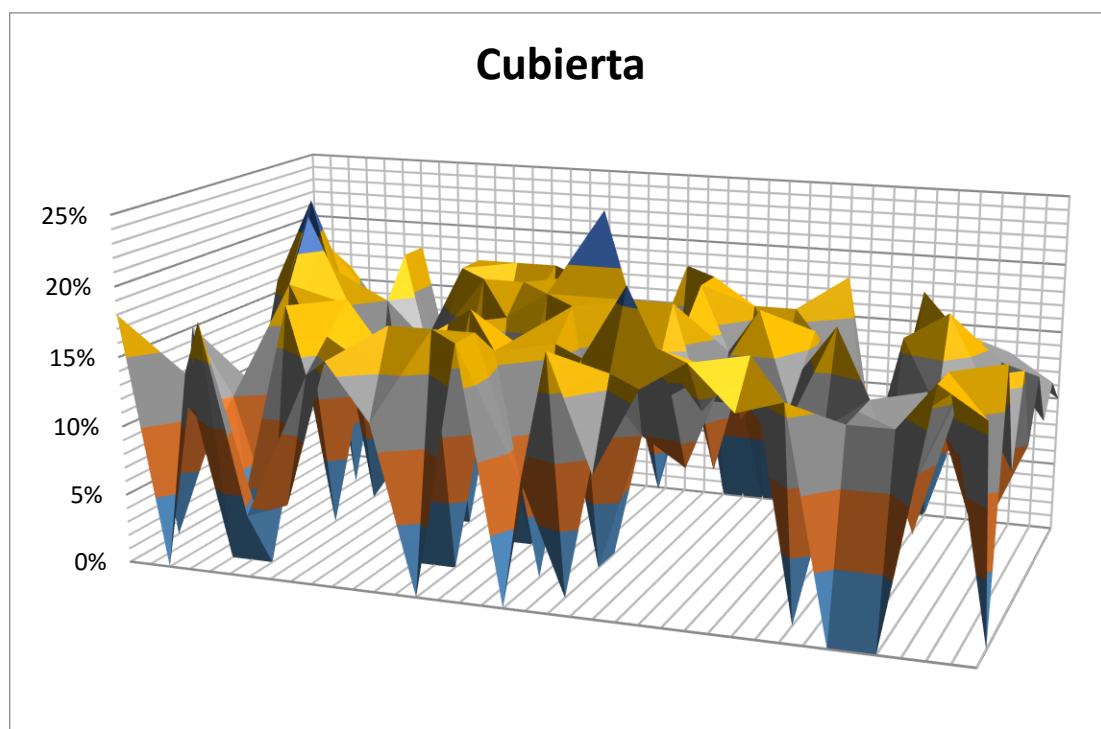


Gráfico 7.12. Mediciones de las planchas en la cubierta mostradas como porcentaje.

En esta parte de la cubierta se observan que las corrosiones son superiores al 25%. La media del porcentaje de la corrosión es de un 12%. Se observan que los valores más altos son puntuales y que no se corresponde a una corrosión generalizada. Esto puede ser debido a que en ese punto la capa protectora de la chapa no se haya aplicado correctamente o que no estuviese preparada la superficie en ese punto en concreto.

CUBIERTA

| Fila | | | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 21 | 4,2 | 4,1 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,8 | 4,4 | 4,3 | |
| 22 | 4,3 | 4,2 | 4,0 | 4,4 | 4,4 | 4,7 | 4,2 | 4,2 | 5,8 | 5,1 | 4,3 | |
| 23 | 4,1 | 4,2 | 4,9 | 4,4 | 4,4 | 4,9 | 4,2 | 5,2 | 4,4 | 5,7 | 4,3 | |
| 24 | 4,0 | 4,2 | 4,4 | 4,5 | 4,2 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 4,3 | 5,8 | 4,9 | |
| 25 | 4,2 | 4,5 | 4,3 | 4,4 | 5,4 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 5,7 | 5,5 | 4,9 | |
| 26 | 8,4 | 3,9 | 6,2 | 6,1 | 6,3 | 6,2 | 4,0 | 3,9 | 4,1 | 4,3 | 8,6 | |
| 27 | 3,6 | 4,1 | 6,3 | 6,1 | 6,0 | 6,2 | 4,3 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 8,3 | |
| 28 | 3,3 | 3,6 | 5,3 | 6,2 | 6,3 | 6,5 | 4,1 | 3,9 | 4,2 | 4,3 | 8,5 | |
| 29 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 6,1 | 6,4 | 6,2 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 8,5 | |
| 30 | 4,0 | 3,5 | 4,4 | 6,4 | 6,3 | 6,2 | 4,3 | 3,9 | 4,6 | 4,3 | 4,3 | |
| 31 | 4,0 | 4,0 | 3,8 | 6,2 | 4,2 | 4,4 | 4,2 | 4,1 | 5,3 | 4,1 | 4,0 | |
| 32 | 3,2 | 4,0 | 6,3 | 5,9 | 4,7 | 4,0 | 3,9 | 6,5 | 5,2 | 4,4 | 4,4 | |
| 33 | 4,2 | 4,0 | 4,0 | 5,8 | 4,0 | 4,1 | 4,0 | 6,7 | 5,1 | 4,4 | 4,3 | |
| 34 | 4,1 | 3,9 | 5,2 | 5,9 | 4,1 | 4,1 | 4,0 | 8,1 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | |
| 35 | 4,1 | 4,0 | 4,2 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 6,6 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | |
| 36 | 4,4 | 4,5 | 4,2 | 4,4 | 4,0 | 4,1 | 6,8 | 6,7 | 4,1 | 4,4 | 4,1 | |
| 37 | 4,2 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,2 | 4,1 | 6,7 | 6,7 | 4,1 | 4,4 | 4,2 | |
| 38 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 4,0 | 4,3 | 6,8 | 4,4 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | |
| 39 | 4,1 | 4,0 | 4,2 | 4,2 | 4,0 | 4,4 | 6,3 | 4,4 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | |
| 40 | 3,8 | 3,9 | 4,2 | 4,1 | 4,0 | 4,2 | 6,9 | 4,4 | 4,4 | 4,3 | 4,3 | |
| 41 | 4,0 | 4,6 | 4,7 | 4,1 | 4,1 | 5,0 | 4,4 | 4,4 | 4,6 | 4,7 | 4,7 | |
| 42 | 4,0 | 4,1 | 4,6 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,5 | 4,6 | 4,6 | 5,0 | 4,6 | |
| 43 | 4,0 | 4,3 | 4,4 | 4,2 | 4,2 | 4,8 | 4,8 | 4,5 | 4,7 | 5,2 | 4,6 | |
| 44 | 4,2 | 4,1 | 4,5 | 4,1 | 4,2 | 4,6 | 4,4 | 5,0 | 4,6 | 4,7 | 5,2 | |
| 45 | 4,2 | 4,2 | 4,3 | 4,0 | 4,3 | 4,6 | 4,6 | 4,8 | 4,8 | 4,7 | 4,8 | |
| 46 | 4,1 | 4,1 | 4,3 | 4,0 | 4,2 | 4,3 | 4,6 | 4,8 | 4,6 | 4,8 | 5,0 | |
| 47 | 4,1 | 4,4 | 4,4 | 4,0 | 4,5 | 4,7 | 6,3 | 6,2 | 6,3 | 4,8 | 5,2 | |
| 48 | 4,2 | 4,2 | 4,6 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 6,2 | 6,5 | 6,5 | 4,9 | 5,2 | |
| 49 | 5,9 | 6,0 | 5,9 | 5,8 | 5,8 | 5,9 | 6,4 | 6,7 | 7,1 | 5,1 | 4,8 | |
| 50 | 5,9 | 6,2 | 6,2 | 6,0 | 5,9 | 6,3 | 6,3 | 6,5 | 7,0 | 5,1 | 5,1 | |
| 51 | 4,4 | 6,2 | 5,9 | 4,3 | 4,5 | 6,4 | 6,3 | 6,4 | 6,7 | 4,8 | 4,9 | |
| 52 | 4,2 | 5,9 | 6,3 | 4,2 | 4,5 | 6,2 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 5,0 | 5,1 | |
| 53 | 4,4 | 6,0 | 6,3 | 4,4 | 4,3 | 6,3 | 6,2 | 6,4 | 6,3 | 4,6 | 4,7 | |
| 54 | 6,0 | 6,9 | 6,6 | 6,4 | 6,8 | 6,9 | 6,8 | 6,5 | 4,2 | 4,4 | 4,5 | |
| 55 | 7,0 | 7,1 | 6,8 | 4,4 | 6,4 | 6,5 | 6,6 | 6,3 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | |

Tabla 7.6. Tabla de valores de espesor de la chapa.

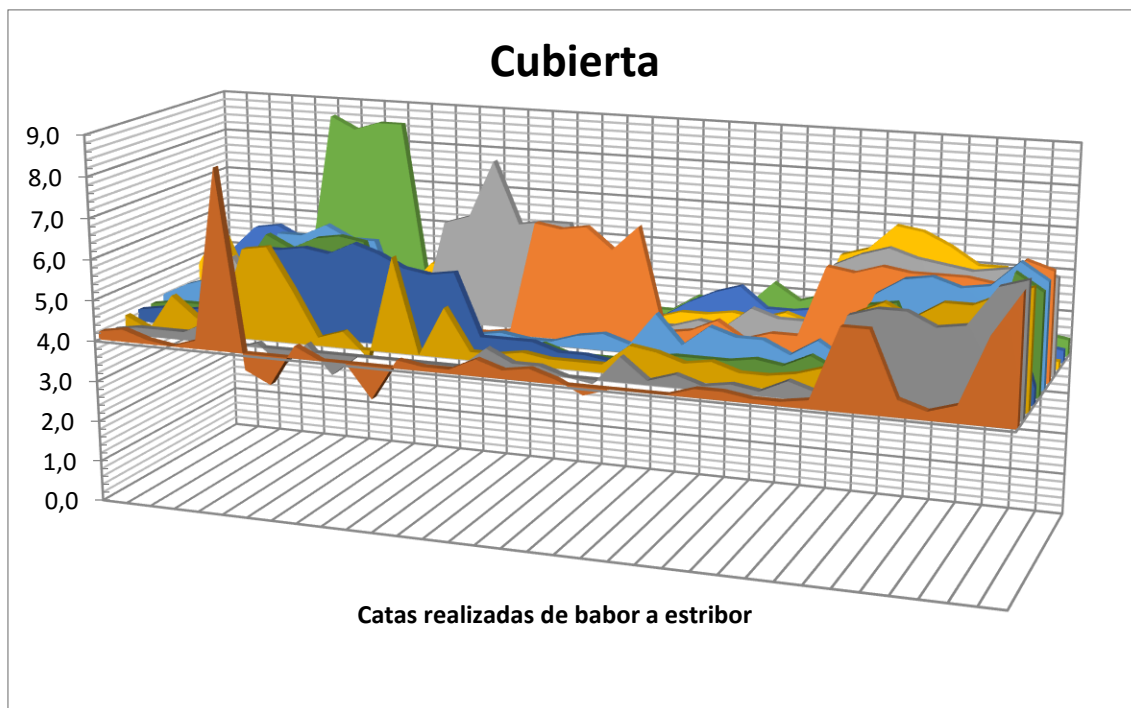


Gráfico 7.13. Mediciones realizadas en la cubierta.

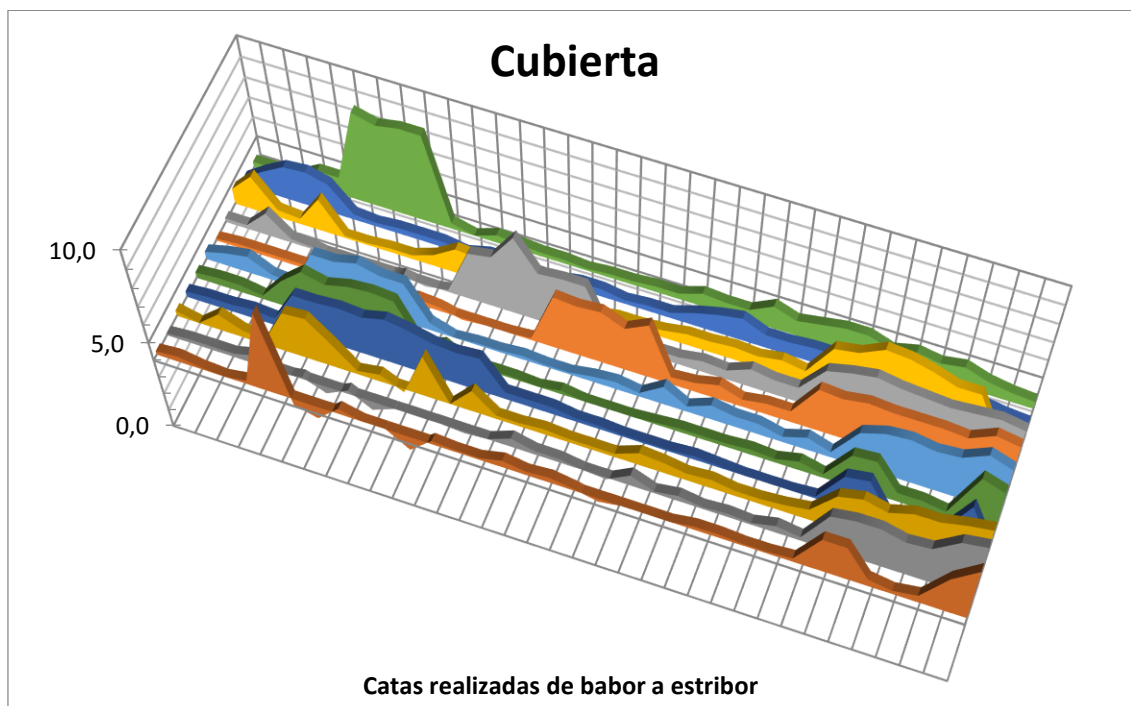


Gráfico 7.14. Mediciones realizadas en la cubierta.

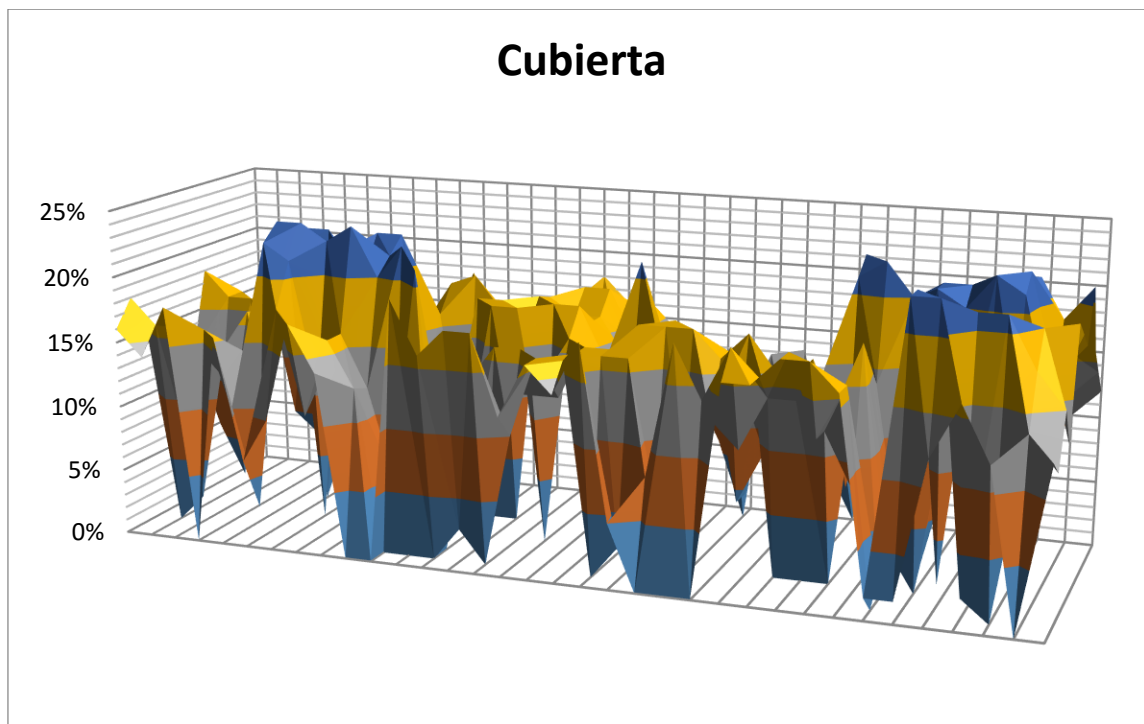


Gráfico 7.15. Porcentajes de las medidas realizadas en la cubierta.

En el gráfico 7.15 se observa que en esta parte de la cubierta tenemos una corrosión máxima del 21%. La media de todos los valores de corrosión es un 12%, esto se debe a que en algunas zonas la corrosión es inexistente. Guedes et al [2] determina que las condiciones atmosféricas en el Mundo son relativamente constantes, esto quiere decir, que este barco tendría condiciones similares sin importar la zona de navegación.

CUBIERTA

| FILA | | | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 56 | 4,7 | 6,9 | 7,2 | 4,6 | 6,6 | 6,3 | 6,6 | 6,2 | 4,5 | 4,6 | 4,9 | |
| 57 | 4,4 | 6,5 | 6,8 | 5,1 | 6,2 | 4,8 | 5,4 | 4,2 | 4,2 | 4,3 | 4,3 | |
| 58 | 5,0 | 6,8 | 6,8 | 4,8 | 6,4 | 6,8 | 5,3 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | |
| 59 | 4,8 | 6,2 | 6,4 | 5,2 | 6,1 | 5,2 | 5,1 | 4,1 | 4,0 | 4,1 | 4,1 | |
| 60 | 4,4 | 6,4 | 6,5 | 5,1 | 6,2 | 4,5 | 4,1 | 4,4 | 4,0 | 4,2 | 4,4 | |
| 61 | 4,2 | 5,3 | 4,5 | 5,9 | 4,4 | 4,6 | 4,8 | 4,7 | | | | |
| 62 | 5,1 | 4,5 | 4,5 | 5,7 | 4,6 | 6,1 | 6,2 | 5,4 | | | | |
| 63 | 4,8 | 4,1 | 4,2 | 5,1 | 4,7 | 6,2 | 5,7 | 5,2 | | | | |
| 64 | 4,1 | 6,9 | 7,0 | 6,9 | 8,6 | 4,5 | 4,4 | 4,2 | | | | |
| 65 | 8,9 | 4,3 | 4,4 | 6,9 | 8,3 | 4,4 | 4,7 | 4,0 | | | | |
| 66 | 9,0 | 5,1 | 5,2 | 7,1 | 4,2 | 4,5 | 4,2 | 4,1 | | | | |
| 67 | 4,6 | 4,5 | 4,2 | 6,5 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | 4,2 | | | | |
| 68 | 4,2 | 4,1 | 4,3 | 4,1 | 3,9 | 4,4 | 5,0 | 5,1 | 5,6 | | | |
| 69 | 4,3 | 4,2 | 3,7 | 4,1 | 3,9 | 4,3 | 4,5 | 5,2 | 5,0 | | | |
| 70 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,3 | 4,1 | 4,4 | 4,4 | 5,2 | 5,1 | | | |
| 71 | 4,9 | 5,3 | 4,1 | 4,4 | 4,0 | 4,4 | 4,5 | 5,1 | 5,2 | 5,3 | | |
| 72 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,3 | 4,1 | 4,3 | 4,5 | 5,2 | 5,1 | 5,2 | | |
| 73 | 4,5 | 4,2 | 4,4 | 4,8 | 4,3 | 4,4 | 4,9 | 5,0 | 5,1 | 5,2 | | |
| 74 | 4,4 | 4,1 | 4,3 | 4,2 | 4,5 | 5,9 | 5,8 | 5,1 | 5,2 | 5,2 | | |
| 75 | 4,2 | 4,4 | 4,3 | 4,2 | 4,0 | 6,0 | 5,8 | 5,0 | 5,2 | 5,2 | | |
| 76 | 4,2 | 6,9 | 6,6 | 6,0 | 5,5 | 5,9 | 5,9 | 5,9 | 5,5 | 5,2 | | |
| 77 | 4,2 | 6,3 | 6,4 | 6,6 | 5,7 | 6,2 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | | | |
| 78 | 4,4 | 6,6 | 6,5 | 7,0 | 5,4 | 6,0 | 6,0 | 5,0 | 5,1 | | | |
| 79 | 4,4 | 7,2 | 6,6 | 6,4 | 6,8 | 6,2 | 6,1 | 5,0 | 5,0 | 5,1 | | |
| 80 | 4,2 | 6,8 | 6,4 | 6,8 | 5,8 | 6,0 | 6,0 | 5,3 | 5,0 | 5,1 | | |
| 81 | 4,4 | 4,1 | 4,8 | 4,1 | 4,0 | 5,9 | 6,0 | 6,1 | 5,0 | 5,2 | | |
| 82 | 4,3 | 4,1 | 4,8 | 4,0 | 4,4 | 6,1 | 6,0 | 5,2 | 5,2 | 5,1 | | |
| 83 | 4,7 | 4,3 | 4,4 | 4,2 | 4,0 | 6,1 | 5,9 | 5,2 | 5,2 | 5,1 | | |
| 84 | 5,8 | 4,4 | 4,3 | 4,2 | 4,0 | 6,1 | 5,9 | 5,1 | 5,1 | | | |
| 85 | 5,8 | 4,4 | 4,3 | 4,0 | 5,0 | 5,6 | 5,3 | 5,5 | 5,4 | | | |
| 86 | 4,5 | 4,4 | 4,4 | 4,5 | 4,2 | 5,5 | 5,6 | 4,7 | 5,2 | 4,6 | | |
| 87 | 4,2 | 4,3 | 4,5 | 4,5 | 4,6 | 5,3 | 5,4 | 5,4 | 5,3 | 4,6 | | |
| 88 | 5,0 | 4,6 | 4,6 | 4,4 | 4,4 | 5,5 | 5,0 | 4,5 | 4,7 | 4,3 | | |
| 89 | 4,3 | 4,9 | 4,7 | 4,7 | 4,8 | 5,0 | 5,3 | 5,2 | 4,7 | 4,3 | | |
| 90 | 4,4 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | 5,3 | 4,3 | 6,0 | 4,3 | 4,2 | | |

Tabla 7.7. Tabla de valores de espesor de la chapa

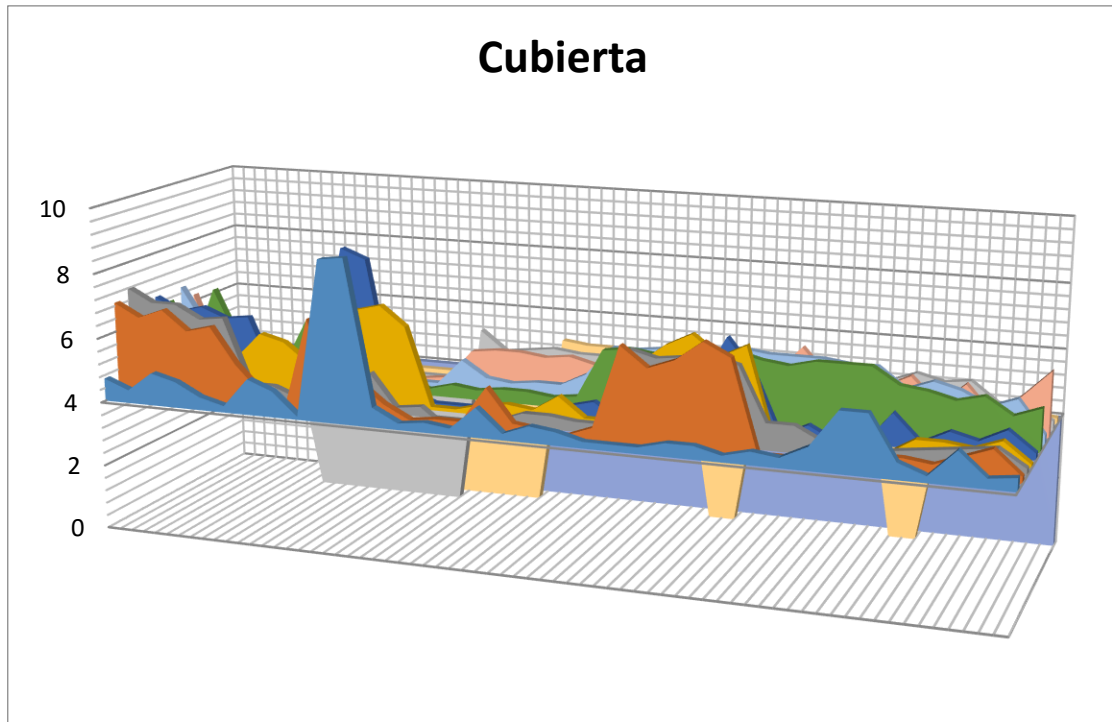


Gráfico 7.16. Mediciones realizadas en la cubierta.

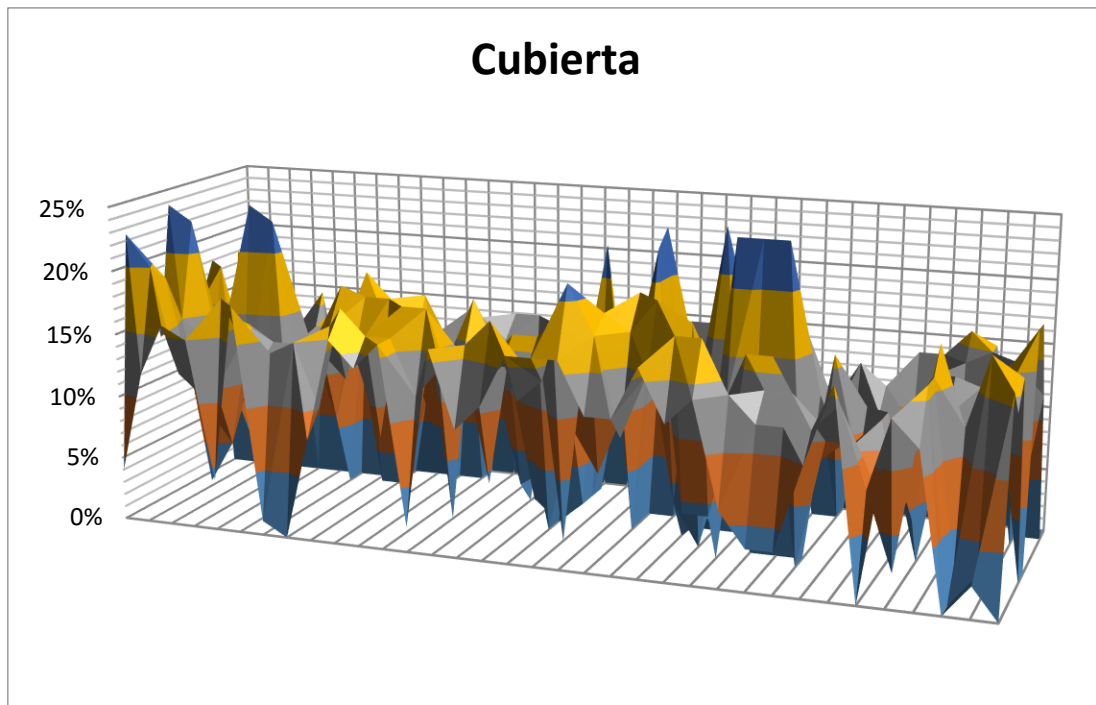


Gráfico 7.17. Porcentajes de las mediciones realizadas en la cubierta.

En esta zona todavía nos encontramos en la zona con picos de corrosión del 22%. En este caso la media de porcentaje de corrosión ha bajado a un 10%. Aunque siga habiendo pérdida de material importante, se puede observar una mejora en el estado de la chapa.

CUBIERTA

| FILA | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 91 | 4,0 | 4,0 | 3,9 | 4,4 | 4,6 | 4,9 | 5,2 | 5,0 | 5,1 | 5,1 |
| 92 | 3,9 | 3,9 | 4,1 | 4,3 | 4,3 | 5,2 | 5,1 | 5,1 | 5,0 | |
| 93 | 4,0 | 4,2 | 4,3 | 4,2 | 4,0 | 4,0 | 4,1 | 4,1 | 4,4 | |
| 94 | 4,0 | 4,8 | 4,3 | 4,2 | 4,4 | 4,4 | 4,1 | 4,3 | 4,0 | |
| 95 | 3,9 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 4,7 | 4,0 | 4,1 | 4,0 | 4,0 | |
| 96 | 4,7 | 4,3 | 4,4 | 4,2 | 4,3 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | 4,2 | |
| 97 | 3,8 | 4,0 | 4,1 | 4,5 | 4,0 | 4,1 | 4,0 | | | |
| 98 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 4,6 | 4,3 | 4,4 | | | | |
| 99 | 3,9 | 4,1 | 4,0 | 4,8 | 4,2 | 4,8 | 4,5 | | | |
| 100 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,4 | 4,5 | | | | |
| 101 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,0 | 4,4 | | | | |
| 102 | 3,8 | 4,2 | 4,4 | 4,5 | 4,4 | 4,5 | | | | |
| 103 | 4,2 | 4,0 | 4,4 | 4,6 | 4,6 | 4,8 | | | | |
| 104 | 4,4 | 4,1 | 4,1 | 4,6 | 4,8 | 4,8 | | | | |
| 105 | 4,0 | 3,9 | 4,5 | 4,4 | 4,4 | 4,5 | | | | |
| 106 | 4,1 | 3,9 | 4,2 | 4,4 | 4,8 | 4,3 | | | | |
| 107 | 4,2 | 4,2 | 4,5 | 4,5 | 4,4 | 4,6 | | | | |
| 108 | 4,0 | 4,2 | 4,2 | 4,6 | 4,4 | 4,4 | | | | |
| 109 | 3,9 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,3 | 4,5 | | | | |
| 110 | 4,0 | 4,3 | 4,1 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | | | | |
| 111 | 4,0 | 4,3 | 3,9 | 4,3 | 4,7 | 4,7 | | | | |
| 112 | 4,6 | 4,1 | 4,0 | 4,4 | 4,3 | 4,3 | | | | |
| 113 | 4,3 | 4,4 | 4,2 | 4,3 | 4,2 | 4,5 | | | | |
| 114 | 4,2 | 4,1 | 4,3 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | | | | |
| 115 | 4,4 | 4,4 | 4,2 | 4,3 | 4,2 | 4,0 | | | | |
| 116 | 4,3 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,3 | | | | |
| 117 | 4,2 | 4,3 | 4,0 | 4,6 | 4,8 | 4,4 | | | | |
| 118 | 4,2 | 6,4 | 3,8 | 4,2 | 4,6 | 4,8 | | | | |
| 119 | 4,6 | 4,7 | 4,3 | 4,6 | 4,5 | 4,3 | | | | |
| 120 | 4,2 | 4,4 | 4,3 | 4,5 | 4,4 | 4,6 | | | | |
| 121 | 4,3 | 4,5 | 4,6 | 4,2 | 4,4 | 4,4 | | | | |
| 122 | 4,5 | 4,4 | 4,3 | 4,5 | 4,4 | 4,6 | | | | |
| 123 | 4,4 | 4,7 | 4,2 | 4,8 | 4,6 | 4,8 | | | | |
| 124 | 4,2 | 4,2 | 4,4 | 4,8 | 4,3 | 4,7 | | | | |
| 125 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,4 | | | | |

Tabla 7.8. Tabla de valores de espesor de la chapa.

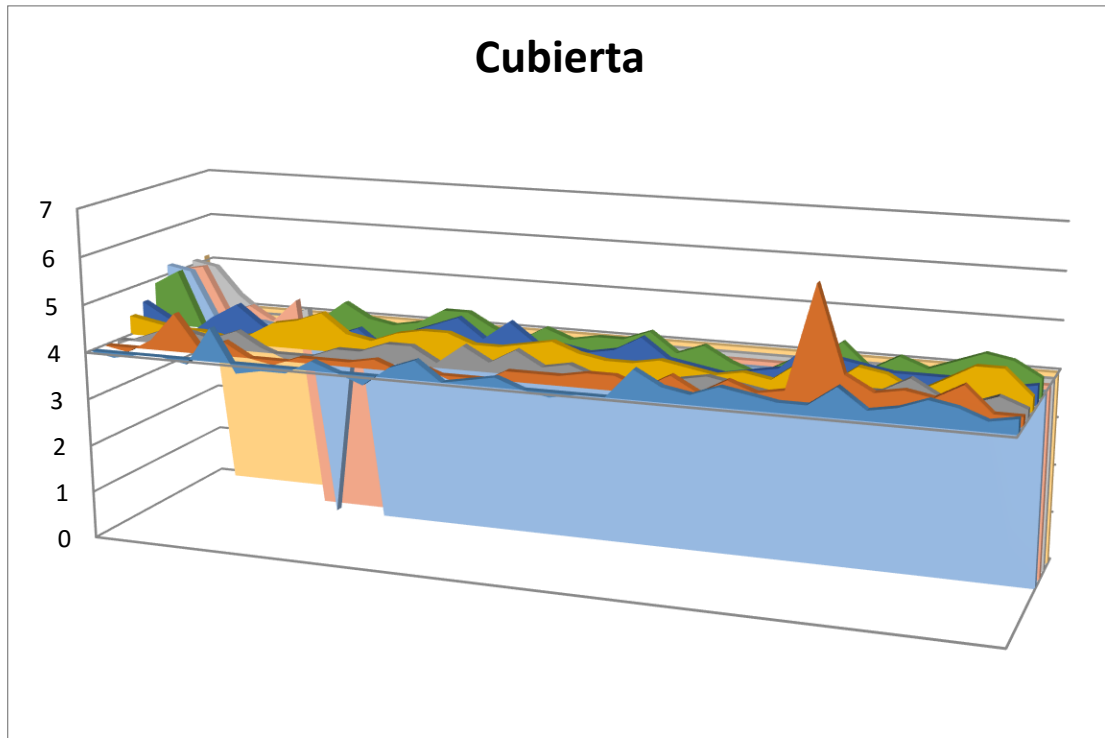


Gráfico 7.18. Gráfico de mediciones de espesores en la cubierta.

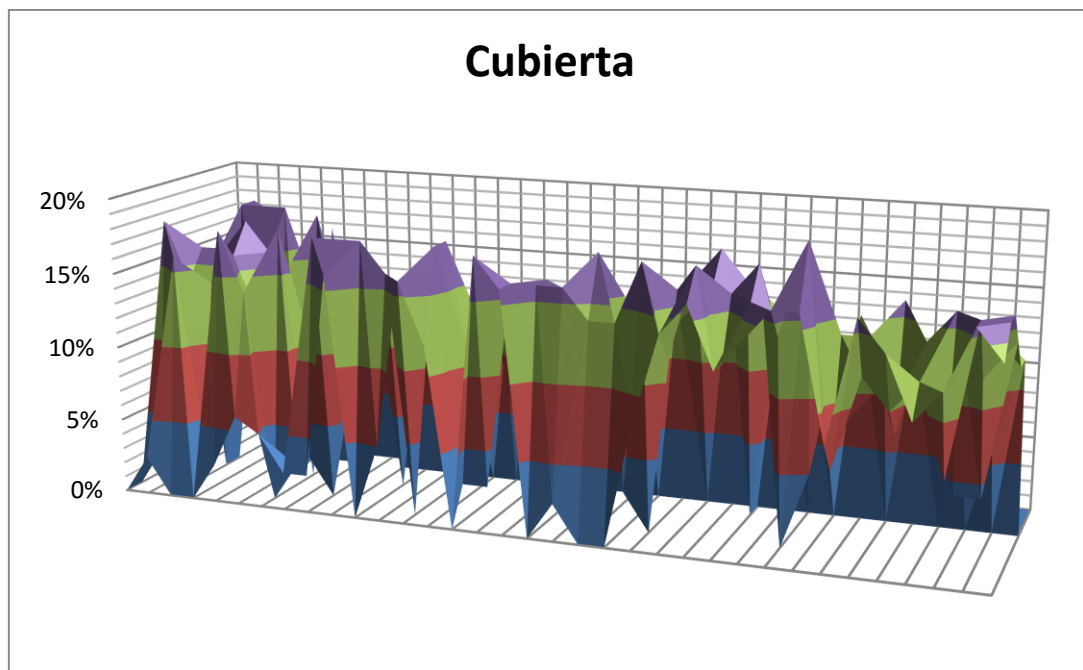


Gráfico 7.19. Gráfico de porcentajes de espesores en la cubierta.

Se puede observar que esta parte de la cubierta con respecto a la anterior es menor, debido a que los valores alcanzan máximos de un 17%, sin embargo, en general tiene una media de corrosión del 11%, lo que significa 1% más que la parte anterior. Esto es debido a que en esta localización existen menores valores pero éstos son más constantes. Cook [8] establece la diferencia de corrosión debido a los diferentes ambientes; sus resultados pueden ser

extrapolados al medio marino para comprender el grado de crecimiento de la corrosión.

CUBIERTA

| FILA | | | | | | | | | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 126 | 4,2 | 4,2 | 4,5 | 4,3 | 4,7 | 4,7 | | | | |
| 127 | 4,7 | 4,3 | 4,2 | 4,4 | 4,5 | 4,6 | | | | |
| 128 | 4,2 | 4,1 | 4,9 | 4,7 | 4,4 | 4,1 | | | | |
| 129 | 4,6 | 4,5 | 4,3 | 4,6 | 4,3 | 4,4 | | | | |
| 130 | 4,2 | 4,2 | 4,8 | 4,5 | 4,6 | 4,5 | | | | |
| 131 | 4,0 | 4,4 | 4,9 | 4,6 | 4,4 | 4,5 | | | | |
| 132 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,2 | 4,4 | 4,4 | | | | |
| 133 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | | | | |
| 134 | 4,6 | 4,9 | 4,7 | 4,0 | 4,2 | 4,3 | | | | |
| 135 | 4,7 | 4,4 | 4,5 | 4,2 | 4,4 | 4,6 | | | | |
| 136 | 4,0 | 3,9 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | | | | |
| 137 | 4,3 | 4,4 | 4,3 | 4,2 | 4,3 | 4,2 | 4,7 | 5,1 | | |
| DE ESTRIBOR A BABOR | | | | | | | | | | |
| 138 | 3,9 | 4,1 | 4,4 | 4,3 | 3,9 | 4,2 | 4,4 | 4,3 | 4,1 | 4,7 |
| 139 | 3,9 | 4,2 | 4,5 | 4,6 | 3,7 | 4,1 | 4,4 | 3,7 | 4,2 | 4,3 |
| 140 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | 4,2 | 3,9 | 4,4 | 4,6 | 4,6 | 4,1 | 4,9 |
| 141 | 4,0 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 4,6 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,5 |
| 142 | 4,0 | 4,2 | 4,2 | 4,4 | 4,4 | 4,4 | 4,2 | 4,5 | 4,4 | 4,4 |
| 143 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,6 | 6,6 | 7,3 | 6,7 | 6,4 | 4,4 | 4,6 |
| 144 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 6,8 | 6,8 | 6,9 | 4,6 | 4,5 | 4,4 | |
| 145 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | 7,0 | 6,9 | 7,3 | 6,8 | 4,5 | 4,9 | |
| 146 | 4,1 | 4,1 | 4,6 | 6,8 | 6,9 | 6,6 | 6,7 | 4,6 | 4,4 | |
| 147 | 9,0 | 4,1 | 4,5 | 6,8 | 6,7 | 6,6 | 6,7 | 4,7 | 4,3 | |
| 148 | 8,5 | 4,2 | 4,2 | 7,3 | 7,4 | 7,1 | 6,7 | 4,3 | 4,6 | |
| 149 | 4,0 | 4,3 | 4,3 | 7,5 | 7,3 | 7,3 | 6,9 | 4,2 | 4,4 | |
| 150 | 4,9 | 5,3 | 4,1 | 4,4 | 4,5 | 5,9 | 5,8 | 5,1 | 5,0 | |
| 151 | 0,4 | 4,2 | 4,0 | 4,6 | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,0 | 4,2 | |
| 152 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,4 | 4,2 | 4,1 | 4,0 | 4,1 | 4,1 | |
| 153 | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,2 | 4,4 | 4,4 | 4,3 | 4,3 | 4,5 | |
| 154 | 4,2 | 4,1 | 4,2 | 4,4 | 4,4 | 4,5 | 4,4 | 4,3 | 4,0 | |
| 155 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 4,6 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,0 | |
| 156 | 4,0 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 4,6 | 4,1 | 4,1 | 4,2 | |
| 157 | 4,2 | 4,3 | 4,1 | 4,4 | 4,4 | 4,0 | 4,5 | 4,3 | 4,6 | |
| 158 | 3,8 | 4,0 | 4,1 | 4,5 | 4,0 | 4,1 | 4,0 | 4,0 | 4,4 | |
| 159 | 3,9 | 3,9 | 3,9 | 4,6 | 4,3 | 4,4 | 4,3 | 4,5 | 4,2 | |
| 160 | 3,9 | 4,1 | 4,0 | 4,8 | 4,2 | 4,8 | 4,5 | 4,4 | 4,3 | |

Tabla 7.9. Tabla de valores de espesor de la chapa.

CUBIERTA

| FILA | | | | | | | | | | | |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|
| 161 | 4,4 | 4,3 | 4,4 | 4,2 | 4,2 | 4,1 | 4,9 | 4,7 | 4,4 | 4,1 | |
| 162 | 4,0 | 4,2 | 4,4 | 4,5 | 4,2 | 4,3 | 4,2 | 4,2 | 4,3 | 4,9 | |
| 163 | 4,1 | 4,0 | 4,2 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,1 | 4,1 | 4,3 | 4,3 | |
| 164 | 4,7 | 6,9 | 7,2 | 4,6 | 6,6 | 6,3 | 6,6 | 6,2 | 4,5 | 4,6 | |
| 165 | 4,2 | 4,5 | 4,3 | 4,4 | 5,4 | 6,2 | 4,3 | 4,0 | 4,1 | 4,2 | |
| 166 | 8,3 | 4,1 | 4,0 | 4,2 | 4,4 | 4,1 | 4,1 | 4,0 | 6,7 | 5,1 | |
| 167 | 4,2 | 4,3 | 4,1 | 4,4 | 4,4 | 4,0 | 4,5 | 4,3 | 4,6 | 4,8 | |
| 168 | 4,6 | 4,8 | 5,0 | 4,4 | 6,2 | 5,9 | 4,3 | 4,5 | 6,3 | 6,2 | |
| 169 | 6,4 | 6,3 | 4,6 | 4,7 | 4,3 | 4,1 | 4,4 | 4,4 | | | |
| 170 | 4,2 | 4,1 | 4,3 | 4,3 | 4,3 | 4,4 | 4,1 | 4,2 | 4,8 | 4,4 | |

Tabla 7.10. Tabla de valores de espesor de la chapa.

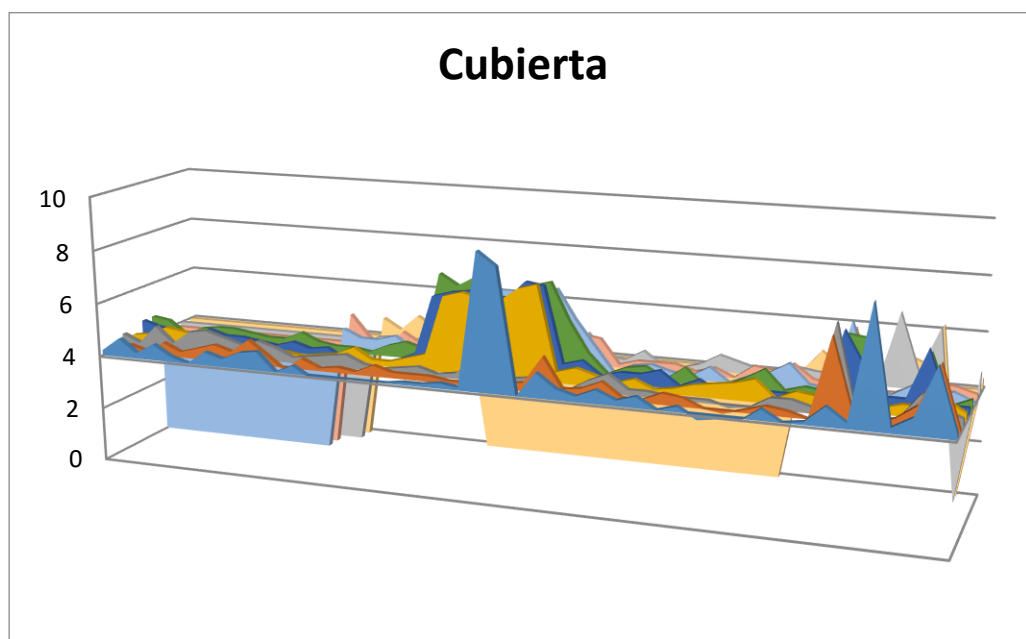


Gráfico 7.20. Mediciones de espesores realizadas en la cubierta.

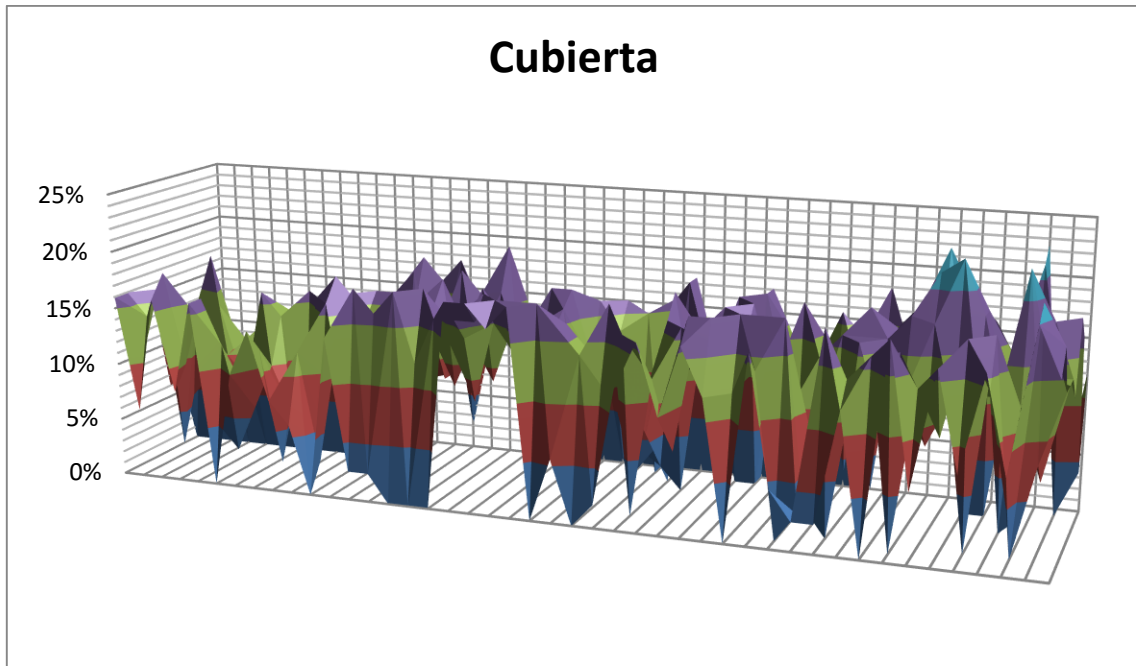


Gráfico 7.21. Gráfico de porcentajes de espesores en la cubierta parte de proa.

Esta parte es la parte de la cubierta situada más a proa de las que se han estudiado. El valor máximo de corrosión es del 23% y su media es del 12%.

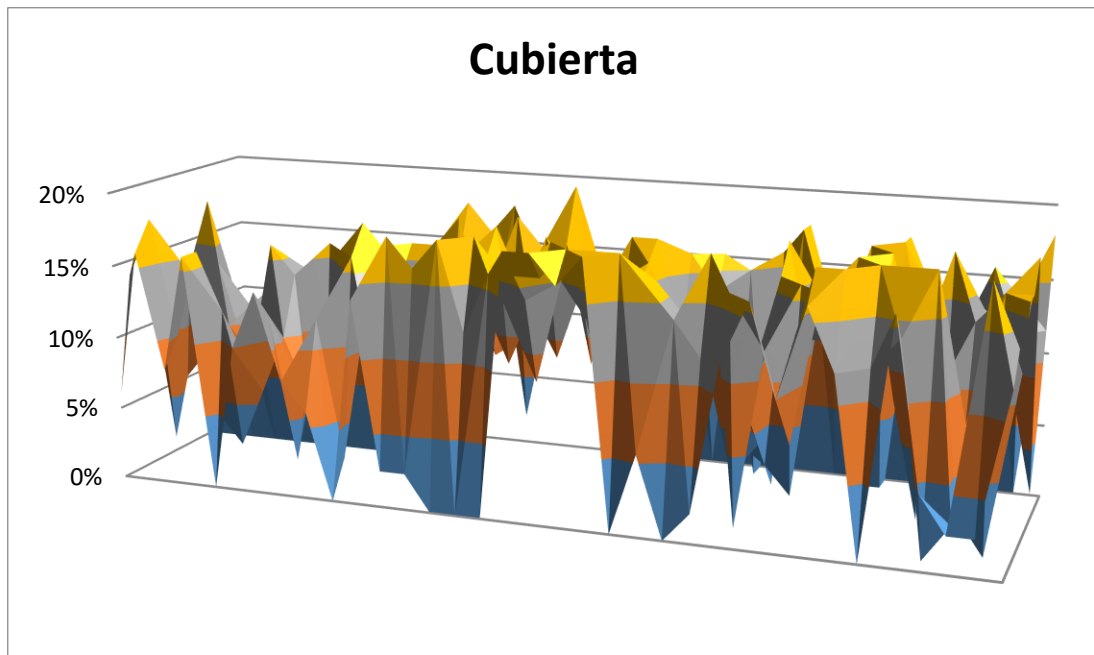


Gráfico 7.22. Gráfico de los espesores eliminando los valores superiores al 20%.

El gráfico 7.22 es el mismo que el gráfico 7.21 pero eliminando la parte de las mediciones que contienen valores superiores al 20%. La media de estos valores es un 11%, se puede observar que la diferencia no es tan grande como se esperaba, debido a que la corrosión se presenta de forma constante en toda la superficie.

7.4 Sumario

Se observa que el valor de corrosión de toda la cubierta es de un 12%, este valor se mantiene en todas las secciones del buque estudiadas con una diferente de un 4% máxima.

También se comprueba que la media de los valores de corrosión tiene poca diferencia con respecto a la situación de la chapa dentro del barco. Solo se nota una disminución en la media cuando la situación de la chapa es más alta. Por ello en esta parte hay menos depósitos y salpicaduras de agua salada, aunque esté expuesta a mayores cambios de temperatura. Esto quiere decir que uno de los factores para evitar la corrosión es la altura en la que se encuentre el objeto. De esta forma se elimina uno de los factores que provocan la corrosión propuesto por Sorensen et al [2]: la zona de salpicadura.

Cook et al [4] establecieron que la aceleración de la corrosión puede ser debida a la aparición de magnetita magnética (Fe_3O_4) y goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$). Dillman et al [7] incluye dentro de estos componentes lepidocrocita ($\gamma\text{-FeOOH}$). Un elemento químico que hay que tener en cuenta es el cromo. Lozano-Pérez et al [11] ha comprobado que el contenido en este elemento acelera la corrosión.

Morcillo et al [5] también establece que la velocidad del viento y su proximidad a tierra es un factor determinante en la aceleración de la corrosión, debido a que así crece la salinidad. Estos resultados también fueron los de Meira et al [6].

La corrosión es función del tiempo [9], pero la degradación por corrosión con respecto al tiempo puede ser disminuida si se realiza una correcta protección y si se realizan las inspecciones de la chapa antes de que los daños sean demasiado graves y afecten a la estructura de la chapa.

LeBozec et al [10] señala la importancia de las protección anticorrosiva en la disminución de los intervalos de reparación.

7.5 Bibliografía

- [1] C. Guedes, Y. Garbatov, A. Zayed, G. Wang (2009). *Influence of environmental factors on corrosion of ship structures in marine atmosphere*. Corrosion Science 51 2014-2026.
- [2] P.A. Sorensen, S. Kiil, K. Dam-Johansen, C.E. Weinell (2009). *Anticorrosive coatings: a review*. J. Coat. Technol. Res. 6 (2) 135-176.
- [3] A. R. Mendoza, F. Corvo (1999). *Outdoor and indoor atmospheric corrosion of carbon steel*. Corrosion Science 30 64-75.
- [4] Oh, S. J., Cook, D. C., & Townsend, H. E. (1999). *Atmospheric corrosion of different steels in marine, rural and industrial environments*. Corrosion Science, 41(9), 1687-1702.
- [5] Morcillo, M., Chico, B., Mariaca, L., & Otero, E. (2000). *Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site*. Corrosion Science, 42(1), 91-104.
- [6] Meira, G. R., Andrade, C., Alonso, C., Padaratz, I. J., & Borba, J. C. (2008). *Modelling sea-salt transport and deposition in marine atmosphere zone—A tool for corrosion studies*. Corrosion Science, 50(9), 2724-2731.
- [7] Dillmann, P., Mazaudier, F., & Hoerle, S. (2004). *Advances in understanding atmospheric corrosion of iron. I. Rust characterisation of ancient ferrous artefacts exposed to indoor atmospheric corrosion*. Corrosion Science, 46(6), 1401-1429.
- [8] Cook, D. C. (2005). *Spectroscopic identification of protective and non-protective corrosion coatings on steel structures in marine environments*. Corrosion Science, 47(10), 2550-2570.
- [9] Melchers, R. E. (2013). *Long-term corrosion of cast irons and steel in marine and atmospheric environments*. Corrosion Science, 68, 186-194.
- [10] LeBozec, N., Thierry, D., Le Calvé, P., Favennec, C., Pautasso, J. P., & Hubert, C. (2015). *Performance of marine and offshore paint systems: Correlation of accelerated corrosion tests and field exposure on operating ships*. Materials and Corrosion, 66(3), 215-225.
- [11] Lozano-Perez, S., Yamada, T., Terachi, T., Schröder, M., English, C. A., Smith, G. D. W., ... & Eyre, B. L. (2009). *Multi-scale characterization of stress corrosion cracking of cold-worked stainless steels and the influence of Cr content*. Acta Materialia, 57(18), 5361-5381.

Capítulo 8. Conclusiones

Capítulo 8. Conclusiones

A partir de los ensayos y estudios realizados se extrajeron las siguientes conclusiones:

- De acuerdo con los ensayos mecánicos, la fundición EN-GJS-500-7U empleada para la fabricación del bastidor cumple las especificaciones y requisitos según la norma correspondiente tanto en la resistencia a tracción como en el límite convencional de elasticidad y en el alargamiento mínimo.
- De acuerdo con los ensayos de dureza, la fundición EN-GJS-500-7U cumple con la norma correspondiente y se encuentra dentro de los límites establecidos.
- La composición química de la fundición EN-GJS-500-7U del bastidor comprobada mediante espectografía reúne las características requeridas en la norma.
- El tamaño del grafito determinado para el bastidor ha sido el 7, forma que es apta para la utilizadaz a la que se le va a dar la fundición.
- El tamaño del grafito, en la fundición EN-GJS-500-7U destinada al bastidor, está entre 0,015 y 0,03 mm. Medidas adecuadas para la función del bastidor.
- De acuerdo con los ensayos mecánicos, la fundición EN-GJS-400-15U empleada para la fabricación de la culata cumple las especificaciones y requisitos según la norma correspondiente tanto en la resistencia a tracción como en el límite convencional de elasticidad y en el alargamiento mínimo es el doble que el del bastidor, lo cual es adecuado para esta parte del motor.
- El análisis espectrográfico de la fundición EN-GJS-400-15U revela que su composición es adecuada para la fabricación de la culata del motor.
- Para la fundición EN-GJS-400-15U se ha determinado un tamaño de grafito de 6, tamaño menor que el del bastidor, pero que es apta para la función que debe desempeñar.
- Los análisis químicos revelan que el cobre tiene un porcentaje del 0,096% que es inferior al del 0,10% que es el límite que establece la norma para no dificultar la grafitización.
- De acuerdo con los ensayos mecánicos, la fundición EN-GJL-200 empleada para la fabricación de la camisa cumple las especificaciones y requisitos según la norma correspondiente tanto en la resistencia a tracción como en el límite convencional de elasticidad y en el alargamiento mínimo.
- El comportamiento mecánico que se observa en el material de la camisa es diferente al del bastidor o la culata, dado que en este caso la rotura es frágil.

- El tamaño para la camisa es de 4 y la medida del grafito es 0,12 y 0,25 mm, datos que son aceptables para la norma y para este caso de fundición gris.
- En cuanto al análisis químico la camisa tiene menos cantidad de carbono y silicio y no tiene cobre. Sin embargo posee más cantidad de manganeso fósforo y azufre, apareciendo trazas de vanadio.
- Mediante los análisis de corrosión que se han llevado a cabo en varios buques se encuentran ampollas motivadas por un fallo en la aplicación del esquema anterior de pintura.
- Las corrosiones se localizan, en el caso de los tanques, en las zonas de esfuerzos y partes bajas del mismo.
- Los esquemas de pintura son incorrectos en un 20% dentro de los casos de los tanques.
- En la mayoría de los casos se deben realizar trabajos de limpieza según la norma ISO 8501:32008 con una presión de entre 150 a 180 bares y una temperatura de entre 70 a 90°C.
- Se encuentra que los tanques con mayor corrosión son los situados en la parte central hasta la proa, esto se debe al gradiente de temperatura que debido a efectos medioambientales son más acusados en esta parte del barco.
- Se encuentra que en la mayoría de los casos la corrosión es debida a la falta de mantenimiento y a no respetar los intervalos para realizar el recubrimiento protector.
- La zona del casco con mayores porcentajes de corrosión se encuentra en la banda de babor entre las cuadernas 18 a 21.
- Entre los anteriores tanques los que necesitan mayor reparación son los tanques de agua dulce con un 70% en su superficie. Los tanques con menores daños son los que se encuentran en la parte baja del buque y por ello tienen una temperatura constante.
- En el caso de las cubiertas se observa que el valor de corrosión es, aproximadamente, de un 12%. Se encuentra que uno de los factores para evitar la corrosión es la altura, dado que se evita las zonas de salpicadura.

Capítulo 9. Investigaciones futuras

Capítulo 9. Investigaciones futuras

Una vez concluido el presente trabajo se nos abren algunas posibilidades y líneas a llevar a cabo en un futuro.

- 1) Estudio de la adecuación de nuevos materiales respetuosos con el medio ambiente para la fabricación de componentes de un barco, esto conllevaría la realización de ensayos mecánicos tanto de tracción como de fatiga en condiciones normales y en condiciones atmosféricas parecidas al medio marino. Para ello se utilizaría una cámara de niebla salina y una célula que ya fue patentada, por entre otros el director de esta tesis, que permite el estudio conjuntamente de corrosión y fatiga con distintas concentraciones de sustancias corrosivas.
- 2) Desarrollo de un método numérico que complemente los existentes y permita la predicción del tiempo de vida de los materiales sujetos al mundo marino, así como la velocidad de corrosión en ese mismo medio. Para ello se prevé desarrollar programas informáticos conforme a leyes empíricas y numéricas que nos permitan esos objetivos.
- 3) Estudio en profundidad del impacto económico que tiene en la economía gallega los paros por reparación e inspección de corrosión. Esto se intentó realizar para la presente tesis, pero fue imposible a la dificultad de recabar datos de ese aspecto, se espera que en un futuro se pueda disponer de dichos datos.
- 4) Desarrollo de un modelo de predicción de la corrosión unida a la flexión del buque como resultado de su vida activa.

Índice de figuras, gráficos, imágenes y tablas

Índice de figuras, gráficos, imágenes y tablas

Capítulo 1

Figura 1.1. Partes de la camisa.

Figura 1.2. Partes de la biela.

Gráfica 1.1. Gráfica tipo de recocido.

Gráfica 1.2. Gráfico tiempo-temperatura del tratamiento de recocido.

Gráfica 1.3. Gráfico °C-tiempo del tratamiento de recocido de la culata.

Gráfica 1.4. Gráfico °C-tiempo del tratamiento recocido de la camisa

Imagen 1.1. Partes del motor.

Imagen 1.2. Detalle del movimiento del pistón.

Imagen 1.3. Movimiento del cigüeñal con respecto al movimiento del pistón.

Imagen 1.4. Culata después de desmoldar.

Capítulo 2

Figura 2.1. Diagrama de mecanizado

Figura 2.2. Esquema de la probeta de la camisa.

Imagen 2.1. Probeta preparada para el ensayo.

Imagen 2.2. Probeta de la camisa.

Imagen 2.3. Máquina de tracción.

Imagen 2.4. Durómetro.

Imagen 2.5. Espectógrafo.

Imagen 2.6. Probeta después de pasar por el espectógrafo.

Imagen 2.7. Determinador de carbono.

Imagen 2.8. Probeta tras obtención de virutas.

Imagen 2.9. Báscula de precisión.

Imagen 2.10. Probeta para el microscopio.

Imagen 2.11 Máquina cortadora.

Imagen 2.12 Rectificadora.

Imagen 2.13 Máquinas lijadoras.

Imagen 2.14. Máquina pulidora.

Imagen 2.15. Microscopio.

Tabla 2.1. Medidas de la probeta de tracción.

Tabla 2.2. Medidas de la probeta.

Tabla 2.3. Equipos de medida utilizados para la calibración.

Tabla 2.4. Valores obtenidos durante la calibración

Tabla. 2.5. Cuadro de resultados de la calibración

Capítulo 3

Figura 3.1. Captura de pantalla de introducción de datos

Figura 3.2. Captura de pantalla de parámetros de ensayo

Figura 3.3. Campura de pantalla parámetros de ensayo límite elástico y extensión

Figura 3.4. Captura de imagen del gráfico del ensayo antes de la introducción de los datos obtenidos.

Gráfica 3.1. Curva tensión deformación bloque(kN-mm)

Gráfica 3.2. Curva tensión deformación (kN-mm) del ensayo de tracción de la culata.

Gráfica 3.3. Curva tensión deformación (kN-mm) del ensayo de tracción de la camisa.

Imagen 3.1. Probeta después del ensayo de tracción

Imagen 3.2. Vista de la parte de rotura de la probeta anterior.

Imagen 3.3. Vista del microscopio X100

Imagen 3.4. Vista del microscopio X400

Imagen 3.5. Figura de referencia de la norma, para realizar la comparación de la forma del grafito.

Imagen 3.6. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

Imagen 3.7. Vista del microscopio de la probeta de la culata X100.

Imagen 3.8. Vista del microscopio de la probeta de la culata X400

Imagen 3.9. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

Imagen 3.10. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

Imagen 3.11. Vista del microscopio X100

Imagen 3.12. Vista del microscopio X400.

Imagen 3.13. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

Imagen 3.14. Figura de referencia de la norma UNE-EN 945-1:2012 [3], para realizar la comparación de la forma del grafito.

Tabla 3.1. Resultados obtenidos del ensayo de tracción del bloque

Tabla 3.2. Tabla resumen de resultados del ensayo de tracción del bloque.

Tabla 3.3. Relación de componentes químicos del bloque

Tabla 3.4. Relación del tamaño del grafito

Tabla 3.5. Resultados obtenidos durante el ensayo de tracción de la culata.

Tabla 3.6. Resumen de resultados obtenidos durante el ensayo de tracción de la culata.

Tabla 3.7. Relación de componentes químicos de la culata.

Tabla 3.8. Relación del tamaño del grafito.

Tabla 3.9. Resultados obtenidos durante el ensayo de tracción de la camisa.

Tabla 3.10. Resultados obtenidos durante el ensayo de tracción de la camisa.

Tabla 3.11. Relación de componentes químicos de la camisa.

Tabla 3.12. Relación del tamaño del grafito.

Capítulo 4

Figura 4.1. Representación gráfica de la relación entre potencial e intensidad (polarización) en una pila Daniell. Fuente: Uhlig H., Corrosion and Corrosion Control.

Figura 4.2. Cambio de pendiente de la curva de polarización catódica como consecuencia de la aparición de fenómenos de polarización de concentración

Figura 4.3. Trazado característico de las curvas de polarización anódica correspondiente a fenómenos de corrosión.

Figura 4.4. Curva de polarización anódica en la que se pone de manifiesto el carácter aditivo de las intensidades cuando tienen lugar varias reacciones de oxidación simultáneas.

Figura 4.5. Forma general de la curva de polarización catódica que muestra la reducción de O₂ de protones o del disolvente a potenciales reductores.

Figura 4.6. Trazado general de la curva de polarización catódica para un material metálico en contacto con un medio aireado a pH neutro o alcalino.

Figura 4.7. Extensión de la zona de pasividad superpuesta al diagrama de Pourbaix para el hierro en aceros inoxidable, y, en general, para aleaciones que basa esta propiedad en la formación de capas pasivas de Cr₂O₃. Fuente: Jones, D.A.: Principles and Prevention of Corrosion.

Figura 4.8. Trazado habitual de la curva de polarización anódica característica cuando se obtiene sobre un material metálico pasivable.

Figura 4.9. Comportamiento a la corrosión de un material metálico pasivable en contacto con medios de distinto carácter oxidante.

Figura 4.10. Modificaciones en la curva de pasivación al cambiar las concentraciones de protones, cloruros o la temperatura de operación.

Figura 4.11. Efecto del contenido de Cr de aleaciones Fe-Cr en contacto con H₂SO₄ sobre el trazado de la curva de pasivación. Fuente: Zaki Ahmad. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control.

Figura 4.12. Efecto de la velocidad de circulación del electrolito, en un sistema bajo control difusional, sobre la estabilidad y/o la capacidad del material para formar capas pasivas en ese medio. Fuente: Zaki Ahmad. Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control.

Figura 4.13. Respuesta del sistema en densidad de corriente frente a tiempo cuando se produce la destrucción de la película pasiva y su posterior reformación (repasivación). Fuente: González, J.A.: Control de la corrosión. Estudio y Medida por Técnicas Electroquímicas.

Figura 4.14. Influencia de las pendientes de las cruvas de polarización sobre la intensidad de corrosión en fenómenos de corrosión galvánica.

Figura 4.15. En sistemas bajo control catódico el tipo de par galvánico no influye de forma relevante en la intensidad de corrosión y, por tanto, en la velocidad de corrosión de metal de comportamiento anódico

Figura 4.16. Corrosión galvánica en un tanque de acero galvanizado que lleva acopladas dos tuberías de cobre, en contacto con agua caliente. El ataque aparece lejos de la unión bimetalica. Fuente: Z. Ahmad. Principles of Engineering and Corrosion Control.

Figura 4.16. Corrosión galvánica en un tanque de acero galvanizado que lleva acopladas dos tuberías de cobre, en contacto con agua caliente. El ataque aparece lejos de la unión bimetalica. Fuente: Z. Ahmad. Principles of Engineering and Corrosion Control.

Figura 4.17. Formación de un par galvánico, al acoplar una tubería nueva a tubería vieja de acero al carbono. El ataque se localiza sobre el tramo de tubería reciente.

Figura 4.18. Efecto de la relación de áreas sobre la cinética de corrosión en fenómenos de corrosión con reacción catódica de reducción de oxígeno. Fuente: Jones, D.A. Principles and Prevention of Corrosion.

Figura 4.19. Influencia de la posible formación de capas estables de productos oxidados sobre la superficie en fenómenos de corrosión galvánica para los pares galvánicos Zn-Cu y Zn-Al.

Figura 4.20. Diagramas de Evans y Pourbaix, que muestran la disminución del potencial al que operan una estructura de acero en contacto con un medio acuoso, cuando se unen eléctricamente a ánodos de Zn, hasta situar al potencial de corrosión en la zona de inmunidad del correspondiente diagrama de Pourbaix.

Figura 4.21. Representación esquemática del mecanismo de corrosión por picadura en el acero. Fuente: Jones, D.A. Principles and Prevention of Corrosion.

Figura 4.22. Correspondencia entre los valores de pH y potencial en la superficie y en el interior de una picadura en un acero al carbono.

Figura 4.23. Zonas de seguridad limitada por los potenciales de pasivación y picadura en materiales metálicos pasivables en contacto con anión agresivo.

Figura 4.24. Diagrama de Evans para un material metálico pasivable, trabajando en medio neutro o alcalino (a) y en medio ácido (b).

Figura 4.25. Factor de picadura. Fuente: Jones, D.A.: Principles and Prevention of Corrosion.

Figura 4.26. Curva potencioestática cíclica para la determinación de E_r y E_{pr} . Fuente: Jones, D.A.: Principles and Prevention of Corrosion.

Figura 4.27. Relación entre pérdida de masa y velocidad de flujo cuando el fluido no transporta sólidos en suspensión.

Figura 4.28. Diagrama de Evans que muestra la posibilidad o no de pasivación en función de la velocidad de flujo.

Figura 4.29. Riesgo de aparición de fenómenos de corrosión-erosión en cambios bruscos de orientación (a) y en cambios bruscos de sección.

Figura 4.30. Relación entre pérdida de masa y velocidad de flujo en tramos horizontales, cuando el fluido transporta sólidos en suspensión.

Figura 4.31. Representación esquemática de las formas de herradura características orientadas en la dirección del flujo de procesos de corrosión-cavitación.

Figura 4.32. Ataque por corrosión-cavitación observado en una bomba de acero inoxidable austenítico. Fuente: Metals Handbook, vol.13.

Figura 4.33. Efecto del espesor de la película de humedad sobre la velocidad de corrosión.

Figura 4.34. Influencia de la humedad relativa de la atmósfera en la velocidad de corrosión del acero en presencia del 0,01% en peso de SO_2 . Fuente: Jones, D.A.: Principles and Prevention of Corrosion.

Figura 4.35. Perfil relativo de corrosión del acero sumergido en agua de mar. Fuente: Jones, D.A. Principles and Prevention of Corrosion

Figura 4.36. Representación esquemática de una tubería enterrada en contacto con suelos de diferente estructura y composición. Si el terreno es conductor puede funcionar el mecanismo de corrosión por macropilas.

Figura 4.37. Secciones del diagrama ternario Fe-Cr-Ni para distintos contenidos en hierro.

Tabla 4.1. Datos de corrosión del hierro formado por galvánico con distintos metales en contacto con una solución NaCl al 1% en peso.

Tabla 4.2. Principales iones que participan en la composición del agua de mar y su concentración en % en peso.

Tabla 4.3. Clasificación de los suelos encuando a su agresividad en función de la resistividad que presentan.

Tabla 4.4. Comportamiento frente a la corrosión de aceros inoxidable de distintas composiciones en contacto con agua de mar en movimiento.

Capítulo 5

Imagen 5.1. Esquema de un tanque y localización de sus partes

Imagen 5.2. Pique de proa exfoliaciones, desprendimientos y oxidaciones en zona de refuerzos.

Imagen 5.3. Pique de proa exfoliaciones, desprendimientos y oxidaciones en zona de refuerzos.

Imagen 5.4. Desprendimientos y oxidaciones en zona de refuerzos.

Imagen 5.5. Oxidaciones y falta de adherencias en zonas con repintados incompatibles.

Imagen 5.6. Imagen del tanque mostraque que la mayor parte de oxidaciones y corrosiones se encuentran en zonas de refuerzos y partes bajas

Imagen 5.7. Imagen del tanque en dónde se observa una corrosión generalizada

Imagen 5.8. Imagen de las ampollas dispersas por todo el tanque en un 35%.

Imagen 5.9. Ampollas dispersas por todo el tanque en un 15%.

Imagen 5.10. Imagen de la falta de adherencia entre el sistema y el acero, en la zona próxima a las ampollas.

Imagen 5.11. Imagen del interior del tanque nº2 doble fondo babor.

Imagen 5.12. Imagen del interior del tanque nº1 profundo estribor.

Imagen 5.13. Estado del tanque nº2 profundo estribor.

Imagen 5.14. Imagen del estado del interior del tanque nº 13 babor.

Imagen 5.15. Estado interior del tanque nº13 estribor.

Imagen 5.16. Oxidaciones en los mamparos del tanque nº2 profundo babor.

Imagen 5.17. Estado del suelo del tanque nº 2 profundo babor.

Tabla 5.1. Tabla resumen de abreviaciones usadas para evaluar el estado de los tanques

Tabla 5.2. Resumen de los datos obtenidos durante la inspección.

Tabla 5.3. Resultados de la inspección del pique de proa.

Tabla 5.4. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

Tabla 5.5. Resultados de la inspección del tanque sanitario.

Tabla 5.6. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

Tabla 5.7. Resultados de la inspección del tanque doble fondo nº1 babor.

Tabla 5.8. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

Tabla 5.9. Resultados de la inspección del tanque doble fondo nº1 estribor.

Tabla 5.10. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

Tabla 5.11. Resultados de la inspección del tanque doble fondo nº1 central

Tabla 5.12. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar

Tabla 5.13. Resultados de la inspección del tanque doble fondo nº2 babor.

Tabla 5.14. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

Tabla 5.15. Resultados de la inspección del tanque nº1 profundo estribor.

Tabla 5.16. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

Tabla 5.17. Resultados de la inspección del tanque nº2 profundo estribor.

Tabla 5.18. Resumen del procedimiento de pintura a utilizar.

Tabla 5.19. Resultados de la inspección del tanque nº13 babor.

Tabla 5.20. Resultados de la inspección del tanque nº13 estribor.

Tabla 5.21. Resultados de la inspección del tanque nº2 profundo babor.

Capítulo 6

Figura 6.1. Vista de toma de espesores en Estribor.

Figura 6.2. Vista de toma de espesores en Babor.

Figura 6.3. Datos relativos al gráfico 6.3.

Figura 6.4. Datos relativos al gráfico 6.4.

Figura 6.5. Datos relativos al gráfico 6.5.

Gráfico 6.1. Visión global de porcentajes de corrosión en el lado de estribor

Gráfico 6.2. Visión global de porcentajes de corrosión en el lado de babor

Gráfica 6.3. Gráfica porcentaje corrosión en la zona de popa estribor

Gráfica 6.4. Gráfica porcentaje corrosión entre las cuadernas 10 a 12 de estribor.

Gráfico 6.5. Corrosión ocurrida en las cuadernas 12 a 16 en la parte estribor del barco.

Gráfico 6.6. Corrosión ocurrida en las cuadernas 16 a 18 en la parte babor del barco.

Gráfico 6.7. Gráfico de porcentaje de corrosión en las cuadernas 18 a 20 en el lado estribor

Gráfico 6.8. Gráfico de porcentaje de corrosión en las cuadernas 18 a 20 en el lado babor.

Gráfica 6.9. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 22 a 35 en la banda de babor.

Gráfica 6.10. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 22 a 35 en la banda de estribor.

Gráfica 6.11. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 48 a 50 en la banda de babor.

Gráfica 6.12. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 46 a 50 en la banda de babor.

Gráfica 6.13. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 31 a 41 parte inferior del barco en la banda de babor.

Gráfica 6.14. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 40 a 41 parte inferior del barco en la banda de babor.

Gráfica 6.15. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 35 a 41 parte inferior del barco en la banda de estribor.

Gráfica 6.16. Gráfico de porcentajes de corrosión entre las cuadernas 36 a 43 parte inferior del barco en la banda de estribor.

Gráfica 6.17. Gráfico de porcentajes de corrosión en las planchas superiores estribor.

Gráfica 6.18. Gráfico de porcentajes de corrosión en las planchas superiores babor.

Gráfico 6.19. Gráfico de porcentajes de corrosión en las cuadernas 18 a 21 en la banda de babor.

Capítulo 7

Gráfico 7.1. Gráfico de porcentajes de corrosión del barco completo

Gráfico 7.2. Mediciones del puente abierto.

Gráfico 7.3. Porcentajes resultado de las mediciones en el puente abierto.

Gráfico 7.4. Mediciones de espesor realizadas en el techo puente.

Gráfico 7.5. Porcentajes en el techo puente.

Gráfico 7.6. Mediciones de espesor realizadas en la cubierta puente.

Gráfico 7.7. Porcentajes de las mediciones realizadas en la cubierta puente.

- Gráfico 7.8. Mediciones de espesor en la cubierta puente, segundo tramo.
Gráfico 7.9. Porcentaje de las mediciones realizadas en la cubierta puente, segundo tramo.
Gráfico 7.10. Porcentaje de las mediciones realizadas en toda la cubierta.
Gráfico 7.11. Mediciones de las planchas en la cubierta.
Gráfico 7.12. Mediciones de las planchas en la cubierta mostradas como porcentaje.
Gráfico 7.13. Mediciones realizadas en la cubierta.
Gráfico 7.14. Mediciones realizadas en la cubierta.
Gráfico 7.15. Porcentajes de las medidas realizadas en la cubierta
Gráfico 7.16. Mediciones realizadas en la cubierta.
Gráfico 7.17. Porcentajes de las mediciones realizadas en la cubierta.
Gráfico 7.18. Gráfico de mediciones de espesores en la cubierta.
Gráfico 7.19. Gráfico de porcentajes de espesores en la cubierta
Gráfico 7.20. Mediciones de espesores realizadas en la cubierta.
Gráfico 7.21. Gráfico de porcentajes de espesores en la cubierta parte de proa.
Gráfico 7.22. Gráfico de los espesores eliminando los valores superiores al 20%.
Tabla 7.1. Tabla de valores de espesor de la chapa puente abierto.
Tabla 7.2. Tabla de valores de espesor de la chapa techo puente.
Tabla 7.3. Tabla de valores de espesor de la chapa cubierta puente.
Tabla 7.4. Tabla de valores de espesor de la chapa cubierta puente 2.
Tabla 7.5. Tabla de valores de espesor de la chapa cubierta.
Tabla 7.6. Tabla de valores de espesor de la chapa cubierta.
Tabla 7.7. Tabla de valores de espesor de la chapa cubierta.
Tabla 7.8. Tabla de valores de espesor de la chapa cubierta.
Tabla 7.9. Tabla de valores de espesor de la chapa cubierta.
Tabla 7.10. Tabla de valores de espesor de la chapa cubierta.