



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis comparativo de la resistencia a la corrosión en acero con
diferentes acabados superficiales*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jesús Descalzo Díez

DIRECTORES: Santiago Urréjola Madriñán
Jorge Eiras Barca

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Análisis comparativo de la resistencia a la corrosión en acero con
diferentes acabados superficiales*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente trabajo de fin de grado analiza la resistencia a la corrosión de distintos acabados superficiales aplicados al acero, con el objetivo de evaluar su desempeño en entornos agresivos. Se estudiaron ocho tratamientos: fosfatado, pavonado TecnanBlue™, pavonado en frío con ácido comercial, fosfatado con cataforesis, zincado en frío, pintado con aerosol, cobreado electrolítico y niquelado electrolítico. Para determinar su efectividad, las piezas fueron sometidas a pruebas en ambientes de estrés salino, simulando condiciones de exposición prolongada a agentes corrosivos.

Los resultados obtenidos permitieron identificar que los tratamientos que ofrecen mayor protección son el pavonado Tecnanblue™ y el pintado mientras que, los que presentan una degradación más acelerada son el fosfatado y el pavonado en frío con ácido comercial. Entre las conclusiones más relevantes, se destaca la influencia de la composición del recubrimiento en la durabilidad del material, así como la importancia del proceso de aplicación para garantizar una cobertura uniforme y efectiva.

Este estudio proporciona información valiosa para sectores industriales y militares que buscan mejorar la resistencia de sus materiales frente a la corrosión. Además, sienta las bases para futuras investigaciones sobre combinaciones de recubrimientos y su desempeño en aplicaciones exigentes, como la industria naval y la fabricación de equipamiento de defensa.

PALABRAS CLAVE

Acero, Corrosión, Tratamientos, Comparativa, Aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Siempre hay que encontrar el tiempo para agradecer a las personas que marcan una diferencia en nuestras vidas.

A mi tutor, D. Jorge Eiras Barca por su paciencia y enseñanzas a lo largo del desarrollo del TFG. Su dedicación y guía han sido fundamentales para poder llegar a buen puerto y cuyas enseñanzas han ido más allá de lo académico.

A mi segundo tutor, D. Santiago Urréjola Madriñán cuyo esfuerzo y disponibilidad han sido absolutas y esenciales durante todo el proyecto.

Un agradecimiento especial también a Abelito y Roberto sin los que hubiera sido imposible ampliar la investigación del TFG al ámbito militar con las visitas al “PCMAYMA” y al acuartelamiento “Capitán Mayoral”. Además, me gustaría destacar la disponibilidad del stte Pérez que resolvió con paciencia todas mis dudas durante todo el recorrido y a todo el personal que con total profesionalidad y amabilidad me mostró su trabajo. Gracias por dedicarme vuestro tiempo y paciencia.

De igual manera, al personal de la Deportiva Militar de Burgos por su apoyo y material imprescindible sobre corrosión y tratamientos superficiales.

No podría haber llegado a redactar nunca estas palabras sin mi familia. Habéis sido un pilar fundamental durante todos estos años de formación y, sin vosotros, jamás hubiera llegado hasta aquí. Gracias a mis padres por enseñarme con su ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. A mis hermanas por su cariño y haber sido mi referencia de sacrificio personal, constancia y superación. En especial, gracias Anita por darle ese toque especial y artístico al trabajo.

Gracias también a Clau por encerrarme en la biblioteca y obligarme a ser responsable todas esas veces que el espíritu flaqueaba. Gracias por tus “vamos viendo” a mis geniales ideas y por todas esas frases que no olvidaré.

Cambiando de tercio, doy gracias a Poseidón y todas las criaturas marinas que se han encargado de cuidar mis piezas y hacer que sean una prueba mucho más realista y duradera. De igual manera, gracias a los buzos de la ENM que se encargaron de rescatarlas de los fondos marinos y permitirme desarrollar el trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a Dios, nuestro Señor, el sagrado don de la vida, que haga en mí de este regalo divino un camino de honor, valentía y rectitud.

Índice de Figuras

Figura 1-1 Distribución mundial de la producción de acero (Fuente: WorldSteel Asociation).....	11
Figura 1-2 Evolución de los costes de mantenimiento debido a los fallos por corrosión. (Tomada de [7]).....	15
Figura 2-1 Daga de acero de damasco [20].....	21
Figura 2-2 Dibujo de la sección de un convertidor Bessemer (tomada de [23]).....	22
Figura 2-3 Horno de arco eléctrico (tomada de [22]).....	22
Figura 2-4 Vista seccional de un alto horno (tomada de [28]).....	23
Figura 2-5 Convertidor Bessemer (tomada de [29])	24
Figura 2-6 partes de un convertidor de oxígeno (tomada de [30]).....	26
Figura 2-7 Proceso de solidificación de acero por colada continua (tomada de [31])	27
Figura 2-8 Monitoreo a tiempo real en el ámbito de la siderurgia (generada mediante inteligencia artificial).....	28
Figura 2-9 Robot tesla que representa el aprendizaje automático (tomada de [32]).....	28
Figura 2-10 Interconexión en la industria 4.0 gracias al IoT (Tomada de [33]).....	28
Figura 2-11 Disociación de la molécula de pintura provocada por la aplicación de corriente continua (tomada de [48]).....	33
Figura 2-12 Coagulación de la pintura (tomada de [48])	33
Figura 3-1 Estado original de las planchas de acero previo al pulido (elaboración propia)	39
Figura 3-2 Pulido de planchas de acero (elaboración propia)	39
Figura 3-3 Cortado de piezas (elaboración propia).....	40
Figura 3-4 Ácido Fosfórico H_3PO_4 (elaboración propia)	41
Figura 3-5 Óxido de manganeso MnO_2 (elaboración propia)	41
Figura 3-6 Comprobación y agitado de piezas durante el fosfatado (elaboración propia).....	42
Figura 3-7 Piezas en agua en ebullición tras el fosfatado (elaboración propia).....	42
Figura 3-8 Pieza fosfatada finalizada (elaboración propia).....	43
Figura 3-9 Montaje para cataforesis (elaboración propia)	44
Figura 3-10 Pieza fosfatado con cataforesis finalizada (elaboración propia)	44
Figura 3-11 Elementos necesarios para la realización del pavonado en frío con ácido comercial (elaboración propia)	45
Figura 3-12 Pieza final pavonado en frío con ácido comercial (elaboración propia)	46
Figura 3-13 Aplicación primera capa de producto (elaboración propia)	46

Figura 3-14 Secado de piezas tras la aplicación de una capa (elaboración propia)	47
Figura 3-15 Pieza final pavonado con aerosol Tecnanblue™ (elaboración propia)	48
Figura 3-16 Primera pieza en el electrolito se aprecia el inicio del cobreado en la parte inferior de la pieza (elaboración propia).....	49
Figura 3-17 Seguimiento del cobreado (elaboración propia).....	49
Figura 3-18 Pieza final cobreada (elaboración propia)	50
Figura 3-19 Piezas cobreadas en el baño de aceite (elaboración propia).....	50
Figura 3-20 Electrolito de níquel formado de color verde azulado (elaboración propia)	51
Figura 3-21 Montaje para el niquelado electrolítico con la pieza bronceada a niquelar en su interior (elaboración propia)	52
Figura 3-22 Pieza cobreada (izquierda) y pieza tras el niquelado (derecha) (elaboración propia)	52
Figura 3-23 Pieza final niquelado electrolítico (elaboración propia).....	53
Figura 3-24 Pieza final zincado en frío (elaboración propia).....	54
Figura 3-25 Aplicación de zincado en frío a las piezas de acero (elaboración propia).....	54
Figura 3-26 Pieza final pintado con aerosol (elaboración propia)	55
Figura 3-27 Imagen satélite de la parte norte del edificio Isaac Peral (tomada de [59]).....	56
Figura 3-28 Imagen de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar (tomada de [60]).....	57
Figura 3-29 Laboratorio de mecánica en el edificio de investigación del CUD (elaboración propia)	57
Figura 3-30 Cámara salina con medidor de pH, humedad y temperatura (elaboración propia)	58
Figura 3-31 Cámara salina con las piezas a estudiar siendo colocadas (elaboración propia).....	58
Figura 3-32 Imagen satélite del muelle de cruceros de la Escuela Naval Militar (tomada de [59]) ..	58
Figura 3-33 Montaje de las cámaras salinas con el medidor de pH y temperatura (elaboración propia)	59
Figura 4-1 Condiciones climatológicas durante las 3 semanas de exposición (tomada de [61]).....	61
Figura A3 - 1 Cañón Otto Melara Mod. 56 (Elaboración Propia)	83
Figura A3 - 2 Desmontaje de varias piezas de artillería de diferentes calibres.....	83
Figura A3 - 3 Santa Bárbara Sistemas 155/52 (Elaboración Propia)	83
Figura A3 - 4 Desmontaje ametralladora Browning 12,7mm	83
Figura A3 - 5 Desmontaje y separación bípodes.....	83
Figura A3 - 6 Separación por tipo de piezas Browning	83
Figura A3 - 7 Ametralladora ligera MG3 desmontada y preparada para su desengrasado	83
Figura A3 - 8 Estación de desengrasado en funcionamiento	83
Figura A3 - 9 Estación de granallado con los cañones del 12,7mm	83
Figura A3 - 10 Máquina de arenado.....	83
Figura A3 - 11 Máquina de arenado operada por el operador para la limpieza de la parte exterior de la serie de MG3.....	83

Figura A3 - 12 Granos de granalla junto a cañón 12,7mm	83
Figura A3 - 13 Estado final tras arenado / granallado.....	83
Figura A3 - 14 Rodillos de limpieza de piezas para pavonado	83
Figura A3 - 15 Tanque de desengrase alcalino	83
Figura A3 - 16 Resultado tras fosfatado.....	83
Figura A3 - 17 Inmersión de las piezas en fosfatium 40.....	83
Figura A3 - 18 Inmersión en emulsión de aceite tras fosfatado	83
Figura A3 - 19 Producto wash primer fosfatante	83
Figura A3 - 20 Productos tratamiento tras el fosfatado	83
Figura A3 - 21 Estación pavonado, tanque agua caliente, tanque agua fría, tranque pavonado (de izquierda a derecha)	83
Figura A3 - 22 Bípodes desmontados	83
Figura A3 - 23 Bípodes listos para montaje y envío	83
Figura A3 - 24 Cañón 12,7mm fosfatado y aceitado	83
Figura A3 - 25 Cañón 12,7mm preparado para desengrasado	83
Figura A3 - 26 Comprobación de soldaduras con líquido penetrante.....	83
Figura A3 - 27 Pieza de artillería montada y operativa.....	83
Figura A3 - 28 Montaje de la tras tratamiento superficial	83
Figura A3 - 30 Máquina de impresión 3D con su respectiva impresión de una parte del cañón de una AML.....	83
Figura A3 - 29 Pieza de impresión 3D en acero inoxidable sin mecanizar.....	83

Índice de Tablas

Tabla 1-1. Aceros no aleados %C, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia).....	12
Tabla 1-2. Aceros no aleados, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia).....	12
Tabla 1-3. Aceros aleados porcentaje de aleación, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia)	13
Tabla 1-4. Aceros aleados atendiendo a calidad, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia)	13
Tabla 1-5. Aceros inoxidables, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia)	14
Tabla 2-1. Producción mundial de los principales metales durante el año 2022 (Elaboración propia).	20
Tabla 2-2 Fabricación de acero; procesos e innovaciones de la industria metalúrgica. Fuentes: [18], [22], [25], [28], [29], [30] (elaboración propia)	28
Tabla 3-1. Tratamientos superficiales y piezas a realizar (Elaboración propia)	38
Tabla 3-2 Material necesario para realizar el fosfatado de manganeso (elaboración propia).	41
Tabla 3-3 Componentes para el fosfatado de manganeso con cataforesis (elaboración propia).....	43
Tabla 3-4 Componentes para el pavonado en frío con ácido comercial (elaboración propia) (ver Figura 3-11)	45
Tabla 3-5 Componentes para pavonado con aerosol Tecnanblue™ (elaboración propia).....	47
Tabla 3-6 Componentes necesarios para cobreado electrolítico (elaboración propia).....	48
Tabla 3-7 Componentes necesarios para niquelado electrolítico (elaboración propia).....	51
Tabla 3-8 Componentes necesarios para zincado en frío (elaboración propia)	53
Tabla 3-9 Componentes necesarios para pintado con aerosol (elaboración propia)	55
Tabla 3-10 Localización de los ambientes de estudio y justificación de selección (elaboración propia)	58
Tabla 4-1 Análisis a microscopio del fosfatado a la intemperie (elaboración propia).....	61
Tabla 4-2 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ a la intemperie (elaboración propia)	62
Tabla 4-3 Análisis a microscopio del pintado a la intemperie (elaboración propia).....	62
Tabla 4-4 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis a la intemperie (elaboración propia)	63
Tabla 4-5 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial a la intemperie (elaboración propia)	63
Tabla 4-6 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico a la intemperie (elaboración propia) ...	64
Tabla 4-7 Análisis a microscopio del zincado en frío a la intemperie (elaboración propia).....	64
Tabla 4-8 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en a la intemperie (elaboración propia)	65
Tabla 4-9 Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara de máquinas (elaboración propia)	66
Tabla 4-10 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en la cámara de máquinas (elaboración propia)	66

Tabla 4-11 Análisis a microscopio del pintado en la cámara de máquinas (elaboración propia)	67
Tabla 4-12 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara de máquinas (elaboración propia)	67
Tabla 4-13 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara de máquinas (elaboración propia)	67
Tabla 4-14 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara de máquinas (elaboración propia)	68
Tabla 4-15 Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara de máquinas (elaboración propia)	68
Tabla 4-16 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara de máquinas (elaboración propia)	69
Tabla 4-17 Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara salina básica (elaboración propia) ...	70
Tabla 4-18 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue TM en la cámara salina básica (elaboración propia)	70
Tabla 4-19 Análisis a microscopio del pintado en la cámara salina básica (elaboración propia)	71
Tabla 4-20 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara salina básica (elaboración propia)	71
Tabla 4-21 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara salina básica (elaboración propia)	72
Tabla 4-22 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara salina básica (elaboración propia)	72
Tabla 4-23 Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara salina básica (elaboración propia)	73
Tabla 4-24 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara salina básica (elaboración propia)	73
Tabla 4-25 Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara salina ácida (elaboración propia)	73
Tabla 4-26 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue TM en la cámara salina ácida (elaboración propia)	74
Tabla 4-27 Análisis a microscopio del pintado en la cámara salina ácida (elaboración propia)	74
Tabla 4-28 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara salina ácida (elaboración propia)	75
Tabla 4-29 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara salina ácida (elaboración propia)	75
Tabla 4-30 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara salina ácida (elaboración propia)	75
Tabla 4-31 Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara salina ácida (elaboración propia)	76
Tabla 4-32 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara salina ácida (elaboración propia)	76
Tabla 4-33 Análisis a microscopio del fosfatado en inmersión (elaboración propia)	77

Tabla 4-34 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en inmersión (elaboración propia)	78
Tabla 4-35 Análisis a microscopio del pintado en inmersión (elaboración propia).....	78
Tabla 4-36 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en inmersión (elaboración propia)	78
Tabla 4-37 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en inmersión (elaboración propia)	79
Tabla 4-38 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en inmersión (elaboración propia)....	79
Tabla 4-39 Análisis a microscopio del zincado en frío en inmersión (elaboración propia).....	80
Tabla 4-40 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en inmersión (elaboración propia)...	80
Tabla 5-1 Sistema de calificación de las propiedades de los acabados superficiales (elaboración propia)	81
Tabla 5-2 Tabla análisis de la viabilidad y resistencia de los acabados (elaboración propia)	82

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

1.1.1 Importancia del acero en la sociedad moderna

En la actualidad, la industria metalúrgica es fundamental para la infraestructura. En la edición de 2024 de World Steel in Figures, se estima una producción mundial durante el ejercicio de 2023 de 1892 millones de toneladas de acero bruto. El director de la Asociación Mundial del Acero, el doctor Edwin Basson, declaró: “*El acero está presente en todas partes de nuestras vidas y por una buena razón. Ha construido el mundo moderno y será igualmente indispensable para el mundo a medida que avance.*” [1].

España se encuentra entre los 17 países con mayor producción, liderados por China con 1019,1 millones de toneladas producidas al año (Ver Figura 1-1).



Figura 1-1 Distribución mundial de la producción de acero (Fuente: WorldSteel Asociación)

Además, se estima que el volumen de toneladas de productos acabados asciende hasta 1763 millones de toneladas, lo que lo convierte en el metal más usado en el mundo. El uso por persona de esta aleación al cabo de 2023 fue de 219 kg [2].

Estos datos no hacen más que avalar la importancia que tiene en la sociedad actual el acero. Y es que, el acero, cuenta con unas propiedades óptimas para la construcción. Sus características dependen de la composición del acero en cuestión, pero, en general destaca este acero sobre el resto por su tenacidad, la maleabilidad y la facilidad de soldadura [2].

1.1.2 Tipos de acero

El acero es una aleación de hierro y carbono que puede contener otros elementos con la intención de modificar sus propiedades mecánicas, químicas y de resistencia a la corrosión para adecuarlas al trabajo que va a desempeñar. Dependiendo de su composición y tratamiento, se clasifica en distintos tipos, cada uno con aplicaciones específicas.

Actualmente, existen numerosas clasificaciones atendiendo a diferentes características del acero. En el caso de la norma española, la UNE-EN 10020 de Febrero de 2001 que es la versión oficial de la Norma Europea EN 10020 de marzo 2000 [3].

Atendiendo a la composición química, los aceros se pueden clasificar en aceros no aleados, aceros aleados y aceros inoxidable. Además, a su vez, la norma UNE-EN 10020:2001, establece una clasificación atendiendo a la calidad del acero y a la aplicación dependiendo del uso que vaya a ser destinado:

1.1.2.1 Aceros no aleados

Los aceros no aleados o aceros al carbono se subdividen en función de la cantidad de carbono que contienen. Esta varía desde un porcentaje menor del 0,25% hasta un 2%.

	Aceros de bajo carbono	Aceros de medio carbono	Aceros de alto carbono
Porcentaje de carbono	Menor 0,25%	Entre 0,25% y 0,55%	Entre 0,55% y 2%
Características	Ductiles y maleables Soldabilidad alta Resistencia baja	Resistencia y dureza Menor soldabilidad Resistencia al desgaste	Dureza y resistencia muy altas Baja soldabilidad y ductilidad Tendencia a la fragilidad
Uso común	Automoción y tuberías.	Engranajes, ejes, rieles.	Herramientas de corte y cables de alta resistencia.

Tabla 1-1. Aceros no aleados %C, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia)

	Aceros no aleados de calidad	Aceros no aleados especiales
Características	Tenacidad, tamaño de grano, formabilidad... etc.	Mayor pureza, templabilidad, elevado límite elástico

Tabla 1-2. Aceros no aleados, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia)

1.1.2.2 Aceros aleados

Son aquellos aceros a los que se les ha añadido algún elemento de aleación distinto al carbono para conseguir una mejora de sus propiedades mecánicas, térmicas o químicas. Se clasifican en función de la cantidad de elementos de aleación.

	De baja aleación	De alta aleación
--	------------------	------------------

Elementos aleantes	Menos del 5%	Más del 5%
Características	Mayor resistencia mecánica y dureza que aceros al carbono Tenacidad y buena soldabilidad	Elevada resistencia a la corrosión, calor y desgaste Menor soldabilidad Precio elevado
Uso común	Puentes y maquinaria pesada	Industria aeroespacial y turbinas

Tabla 1-3. Aceros aleados porcentaje de aleación, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia)

	Aceros aleados de calidad	Aceros aleados especiales
Características	Buen comportamiento frente a la tenacidad Control de tamaño de grano Buena comportamiento de formabilidad	Control preciso de su composición química y de unas condiciones particulares de elaboración y control Asegura unas propiedades mejoradas
Subtipos	Construcción Metálica Carriles, tablestacas y cuadros de entibación de minas Productos planos, laminados en caliente o frío Único elemento aleante cobre Aplicaciones eléctricas	Aceros aleados destinados a la construcción mecánica y aparatos de presión Aceros para rodamientos Aceros para herramientas Aceros rápidos Otros aceros con características físicas especiales, como aceros con coeficiente de dilatación controlado, con resistencias eléctricas, etc.

Tabla 1-4. Aceros aleados atendiendo a calidad, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia)

1.1.2.3 Aceros inoxidables

El acero inoxidable es una aleación de hierro que se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión y a la oxidación. Estos aceros, contienen un mínimo de un 10,5% de cromo (Cr) y un máximo de 1,2% de carbono. Su propiedad distintiva radica en la presencia de cromo, el cual reacciona con el oxígeno del aire para formar una fina capa de óxido de cromo en la superficie del material. Esta capa pasivadora es autorreparable, lo que impide la propagación de la corrosión y otorga al material su resistencia característica.

Por su contenido de níquel	Por sus características físicas
----------------------------	---------------------------------

Tipos	Menor a	Mayor o	Aceros inoxidables resistentes a la corrosión	Aceros inoxidables con buena resistencia a la oxidación en caliente	Aceros inoxidables con buenas prestaciones frente a la fluencia
	2,5%	igual 2,5%			

Tabla 1-5. Aceros inoxidables, Fuente: Norma UNE-EN 10020:2001 (Elaboración propia)

1.1.3 Corrosión en estructuras metálicas

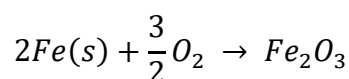
La corrosión es un proceso químico espontáneo mediante el cual, los diferentes se deterioran debido a estas reacciones químicas con el medio. Este proceso da lugar a compuestos más estables como lo son los óxidos, hidróxidos y sulfuros. El fenómeno de la corrosión implica una interacción entre, en el encuadramiento del trabajo, el metal y agentes corrosivos presentes en el ambiente como el oxígeno, la humedad y ciertos compuestos químicos [4].

Existen dos mecanismos diferentes de corrosión [5]:

1. Corrosión química directa

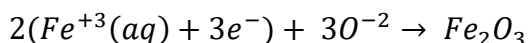
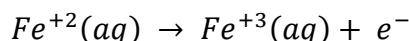
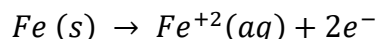
Es aquella que se da en la reacción directa entre el metal y sustancias corrosivas sin presencia de una corriente eléctrica.

Un ejemplo de este tipo de oxidación es la corrosión del hierro en contacto con el oxígeno cuya fórmula se muestra a continuación.



2. Corrosión electroquímica

Involucra reacciones electroquímicas donde se forman celdas galvánicas debido a diferencias de potencial entre distintas áreas de un metal o entre metales diferentes en contacto. Este tipo de corrosión es común en ambientes húmedos en los que esa humedad funciona como electrolito natural y puede manifestarse de diversas formas, como corrosión galvánica, por picaduras o por grietas.



De los anteriores mecanismos de corrosión, la corrosión electroquímica para los metales empleados en la construcción naval es un problema de gran magnitud debido a la constante exposición de estos al ambiente marino, un medio altamente agresivo por la presencia de humedad, sales y otros agentes corrosivos. Al sumergirse en el agua de mar, los buques se convierten en verdaderas pilas galvánicas, donde los metales de menor potencial actúan como ánodos y pierden material en beneficio de los de mayor potencial, que actúan como cátodos.

Incluso fuera del agua, la atmósfera marina sigue siendo un factor de riesgo, acelerando la degradación de estructuras y equipos metálicos. Y, es por esto que este fenómeno no solo representa un desafío técnico, sino también un problema económico de gran envergadura. Se estima que la corrosión tiene un costo global aproximado de 2.5 billones de dólares, lo que

equivale al 3.4% del PIB mundial. En países como Estados Unidos, las pérdidas asociadas a la corrosión representan un porcentaje significativo del PIB, debido a los costos de mantenimiento, reparación y sustitución de materiales. En Europa y otras regiones industrializadas, la situación es similar, lo que demuestra la necesidad de implementar estrategias eficaces de protección [6].

Dentro del análisis de costos relacionados con la corrosión, es importante diferenciar entre costos inevitables y evitables. Según estudios previos, en sectores como el energético, se estima que aproximadamente un 42% de los costos asociados a la corrosión podrían reducirse mediante estrategias de prevención y mantenimiento adecuados [7]. De manera similar, en el ámbito de la construcción naval, cerca del 20% del acero utilizado en astilleros se destina al sobredimensionamiento de materiales para compensar la pérdida de espesor causada por la corrosión, lo que representa un importante sobre costo en la fabricación de embarcaciones.

Además, informes especializados han evidenciado que la industria del transporte y la marina son de los sectores más afectados por los gastos derivados de la corrosión. En algunos países europeos, estos costos han llegado a representar hasta un 21% del total de pérdidas económicas por corrosión en la industria. Este panorama pone de manifiesto la urgencia de desarrollar estrategias de mitigación más eficientes, que no sólo reduzcan las pérdidas económicas, sino que también minimicen el impacto ambiental asociado a la degradación y reposición de materiales metálicos [7].

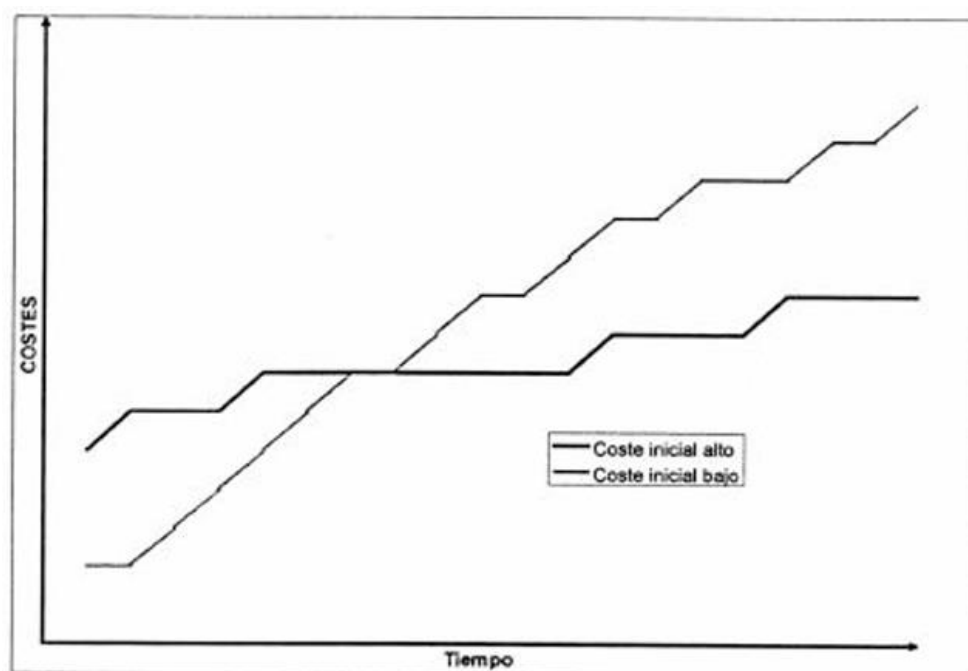


Figura 1-2 Evolución de los costes de mantenimiento debido a los fallos por corrosión. (Tomada de [7])

1.1.4 Tratamientos superficiales

El acero, un material ampliamente utilizado en la construcción, la industria automotriz, la manufactura y otros sectores, es apreciado por su resistencia, durabilidad y versatilidad. Sin embargo, su susceptibilidad a la corrosión y el desgaste puede limitar su vida útil y rendimiento en ciertos entornos. Para contrarrestar estos desafíos y mejorar la funcionalidad del acero, se han desarrollado diversos tratamientos superficiales a lo largo del tiempo. Estos tratamientos se aplican a la superficie del acero para mejorar características como la resistencia a la corrosión, la apariencia estética, la resistencia al desgaste, entre otras.

Históricamente, los tratamientos superficiales del acero datan del siglo XIX, cuando los avances en metalurgia y procesos químicos permitieron mejoras en el rendimiento del acero. No obstante, está

demostrado que en ya en la antigüedad, se empleaban métodos rudimentarios para aumentar la vida útil y funcionalidad de las herramientas metálicas. Ya en el siglo XIX, a medida que las industrias crecían y aumentaba la demanda de materiales más duraderos y rentables, los tratamientos superficiales se volvieron esenciales para prolongar la vida útil de los productos de acero. Estos tratamientos van desde recubrimientos mecánicos sencillos hasta procesos químicos más complejos, cada uno con ventajas distintas. Algunos de los tratamientos superficiales más comunes para el acero incluyen el fosfatado, el pavonado, el niquelado, el cobreado, el galvanizado y la aplicación de pintura base o pintura [8].

Cada uno de estos tratamientos implica un método diferente de alterar la superficie del acero, ya sea mediante la aplicación de un recubrimiento, una reacción química o una combinación de ambos. A continuación, se expone brevemente el origen y proceso químico de los tratamientos generales que serán objeto de estudio.

1.1.4.1 Fosfatado

El fosfatado, también conocido como recubrimiento de fosfato, ha sido un tratamiento vital para el acero durante más de un siglo. El proceso consiste en aplicar una capa de fosfato a la superficie del acero, principalmente para aumentar su resistencia a la corrosión y el desgaste. Este tratamiento surge en tiempos del Imperio Romano, pero, no comenzó a ser utilizado de manera generalizada hasta principios del siglo XX en las industrias automotriz y aeroespacial, donde su capacidad para mejorar la adherencia de lubricantes y pinturas resultó invaluable. El fosfatado sigue siendo un tratamiento ampliamente utilizado hoy en día, especialmente en industrias que requieren protección contra el óxido y el desgaste [9].

El fosfatado es un proceso en el cual la superficie del acero se trata con una solución que contiene ácido fosfórico y sales metálicas (generalmente zinc, manganeso o hierro). La reacción química forma una capa cristalina de fosfato sobre la superficie del acero. Esta capa generalmente está compuesta por fosfatos metálicos insolubles que se adhieren firmemente al acero, ofreciendo mayor resistencia a la corrosión y mejor adherencia de pintura. El proceso también permite una alta lubricación superficial, lo que lo hace beneficioso para componentes sujetos a fricción [10].

1.1.4.2 Pavonado

El pavonado es uno de los tratamientos más antiguos del acero, es por ello que no se puede limitar su descubrimiento y utilización a una época en concreto [11]. No obstante, se desarrolló inicialmente en el siglo XIX. Fue particularmente popular para los cañones de armas de fuego, donde tanto la resistencia a la corrosión como el atractivo estético eran esenciales. El proceso se adoptó posteriormente en otras aplicaciones donde el acero necesitaba resistir el óxido, mientras mantenía su integridad estructural [12].

Químicamente, el pavonado implica la creación de una capa delgada de óxido en la superficie del acero, que le da al material su característica apariencia azul o negra. El proceso generalmente consiste en sumergir el acero en una solución caliente de hidróxido de sodio, nitrato de potasio y otros productos químicos. Este baño químico provoca una reacción que forma una capa delgada y protectora de magnetita (Fe_3O_4), un tipo de óxido de hierro, sobre la superficie del acero. La capa de magnetita es relativamente estable, protegiendo al acero de la corrosión mientras le da una apariencia negro-azulada [13].

1.1.4.3 Niquelado

El niquelado ha sido un tratamiento superficial ampliamente utilizado desde finales del siglo XIX. Se hizo popular en las industrias automotriz y eléctrica, donde sus propiedades anticorrosivas lo hacían muy adecuado para partes expuestas a la humedad y otros entornos agresivos. Con el tiempo, el niquelado

también ha encontrado aplicaciones en acabados decorativos debido a su superficie brillante y reflectante [14].

Desde el punto de vista químico, con este proceso se deposita una capa delgada de níquel sobre la superficie del acero mediante un proceso electroquímico llamado electrodeposición. En este proceso, el acero actúa como el cátodo en una celda electrolítica, donde los iones de níquel de una solución (generalmente sulfato de níquel o cloruro de níquel) o el ánodo de níquel, se reducen y se depositan sobre la superficie del acero [15].

La capa de níquel depositada mejora la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste y las cualidades estéticas del acero. El acabado puede variar en apariencia, desde mate hasta una superficie brillante y brillante, dependiendo de las condiciones del proceso de recubrimiento. El niquelado también puede mejorar la capacidad del acero para conducir electricidad, lo que lo hace útil en componentes electrónicos [15].

1.1.4.4 Cobreado

Este proceso data de los antiguos egipcios, se ha utilizado durante milenios para diversos fines. En tiempos modernos, el cobreado se usa comúnmente tanto para aplicaciones funcionales como estéticas. Se valora especialmente en la industria eléctrica y la industria de fontanería por su excelente conductividad y resistencia a la corrosión en ambientes específicos [16].

El proceso se lleva a cabo mediante electroplatinado, de manera similar al niquelado. En este proceso, la pieza de acero se sumerge en una solución de sulfato de cobre, donde los iones de cobre se depositan sobre la superficie del acero cuando se pasa una corriente eléctrica a través del electrolito. Además, al igual que el resto de recubrimientos por electrólisis, se realiza el cobreado por transporte de electrones entre ánodo y cátodo usando como medio el electrolito. El recubrimiento resultante de cobre proporciona una superficie lisa, conductora y resistente a la corrosión.

1.1.4.5 Galvanizado

El galvanizado emergió como un método confiable de protección contra la corrosión para el acero a principios del siglo XX. Desde entonces, se ha convertido en uno de los tratamientos superficiales más populares para el acero, particularmente en las industrias automotriz, de construcción y manufactura. La capacidad del zinc para proteger el acero del óxido mediante corrosión sacrificial lo hizo invaluable en entornos exteriores y de alta humedad.

Con este tratamiento, se aplica una capa delgada de zinc a la superficie del acero mediante electroplatinado. En un baño electrolítico, los iones de zinc de una solución de sulfato de zinc o cloruro de zinc se reducen y se depositan sobre el acero. Y, al igual que en los anteriores, se puede realizar con el empleo de un ánodo de zinc puro cuyos electrones al aplicar la corriente eléctrica, se depositarán en el cátodo. El recubrimiento resultante de zinc forma una capa protectora que protege el acero subyacente de la corrosión.

La naturaleza sacrificial del zinc es crucial para su efectividad: cuando se expone a la humedad, el zinc se corroe preferentemente, protegiendo el acero debajo de él.

1.1.4.6 Pintado

La pintura y la aplicación de pintura base son algunos de los métodos más antiguos para proteger las superficies del acero. Sus primeras aplicaciones se dan en forma de esmalte a piezas metálicas en oriente durante el siglo X, probablemente en China. Estos esmaltados no eran solo realizados con objetivos estéticos, sino como método para retrasar la aparición de corrosión [17]. El auge de su posterior aplicación sistemática no aparece hasta principios del siglo XIX durante la revolución industrial. La capacidad de aplicar recubrimientos tanto decorativos como protectores ha hecho de la pintura un proceso esencial en numerosos sectores, desde la construcción hasta la fabricación automotriz.

El proceso de pintura base implica la aplicación de una capa de imprimación sobre el acero para mejorar la adherencia y la resistencia a la corrosión antes de aplicar una capa superior de pintura. La imprimación generalmente contiene inhibidores de la corrosión y compuestos que promueven la adherencia entre el acero y la pintura. Después de aplicar y curar la imprimación, se agrega una capa de pintura, ofreciendo tanto atractivo estético como protección adicional contra el desgaste y la corrosión.

La pintura base es esencial para el acero expuesto a condiciones ambientales severas, donde se requiere una combinación de protección contra la corrosión y un acabado decorativo. Los tipos comunes de imprimantes incluyen imprimantes epóxicos, ricos en zinc y de poliuretano, cada uno ofreciendo beneficios específicos según la aplicación.

1.2 Objetivos del estudio

El objetivo del proyecto es la evaluación y estudio de la efectividad de los diferentes acabados superficiales sobre el acero. La efectividad será evaluada con el análisis de la corrosión experimentada por las piezas tras la exposición a diferentes ambientes. Además, se realizará el análisis de viabilidad de uso de los diferentes métodos en el ámbito de las Fuerzas Armadas y, más en concreto, en el ámbito naval.

Teniendo en cuenta que las herramientas de trabajo son en su mayoría metálicas y que las plataformas de las que dispone la Armada Española son también metálicas encontrándose además sometidas a un medio altamente corrosivo, es de especial interés implementar el uso de los diferentes métodos de tratamientos superficiales para evitar la corrosión atendiendo a la aplicación y uso de los mismos en los diferentes ámbitos de trabajo. Con ello se espera poder realizar la selección del método que mejor resiste la corrosión y que además resulte viable establecer estos tratamientos en los talleres de los buques, unidades y compañías, consiguiendo así mantener la capacidad operativa de las unidades y realizar reparaciones y mantenimientos de las piezas en campaña sin necesidad de tener que enviar a un taller fijo y especializado las herramientas o piezas.

Igualmente, partiendo de esto, se desarrollan los siguientes objetivos complementarios:

- Estudio de los diferentes tratamientos superficiales, evaluar las características de estos métodos y el estudio de la resistencia que ofrecen a la corrosión.
- Aplicación de los tratamientos en piezas de acero con el objetivo de evaluar la complejidad de cada uno de los tratamientos, estudiar la uniformidad del acabado y características físicas que ofrecen.
- Exposición de las piezas tratadas a diferentes ambientes que contribuyan a la aparición de corrosión y comparar la resistencia que ofrece cada acabado superficial.
- Analizar los efectos de la corrosión en las piezas y determinar la adecuación de los tratamientos a los usos y exposiciones a los que van a estar sometidos.
- Incluir un diagnóstico de viabilidad de implementación en los buques y unidades de la Armada.

1.3 Estructura de la memoria

Una vez expuesto el contexto en el que se desarrolla el proyecto y definidos los objetivos y motivación del trabajo, se define la estructura de la siguiente manera:

- Capítulo 1: Introducción y objetivos. Apartado de información general del proyecto y objetivos a desarrollar.
- Capítulo 2: Estado del arte. Revisión bibliográfica de contextualización del trabajo.
- Capítulo 3: Desarrollo del TFG. Definición de los acabados superficiales, proceso, montajes y tareas realizadas.
- Capítulo 4: Resultados. Análisis de la resistencia a la corrosión experimentada por cada uno de los acabados
- Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras. Optimización de procesos actuales y futuras líneas de acción relacionadas con estos.

Además de esto, se incorporan Anexos que amplían los conocimientos en el campo de este trabajo así como el informe de la visita oficial al PCMAYMA con la que ilustrar los métodos actualmente empleados en el ámbito de las fuerzas armadas.

- I. Anexo I: Implicaciones sociales, y/o económicas, y/o ambientales. Desarrollo de por qué este proyecto no tiene implicaciones sociales y/o económicas y/o ambientales.
- II. Anexo II: Reflexiones éticas y sociales. Razonamiento de qué riesgos sociales y éticos pueden derivarse de estos procesos por pasivación, si bien, este proyecto se enfoca en competencias técnicas y científicas.
- III. Anexo III: estudio de acabados en el PCMAYMA: desarrolla la visita al cuartel así como los procesos que se realizan trabajando tanto con armamento de pequeño calibre a grandes piezas de artillería.
- IV. Anexo IV: cálculo del pH de las cámaras salinas: se detallan los cálculos para la obtención del pH de los medios salinos controlados.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 El acero

El acero ha desempeñado un papel fundamental en el desarrollo industrial y económico a nivel mundial. Esta aleación de hierro y carbono destaca principalmente por su versatilidad, resistencia, facilidad de conformado y durabilidad. Estas características lo convierten en un material indispensable en múltiples sectores industriales. Los principales sectores son los siguientes:

- **Construcción e infraestructuras:** El acero es esencial en la construcción de edificios, puentes, elementos de protección y otras infraestructuras debido a su resistencia y capacidad para soportar cargas pesadas. Su uso permite la creación de estructuras más seguras y duraderas.
- **Industria automotriz:** En la fabricación de vehículos, el acero se utiliza en chasis, carrocerías y componentes críticos, proporcionando seguridad y eficiencia.
- **Energía:** El sector energético emplea acero en la construcción de plataformas petrolíferas, torres eólicas y plantas de energía, debido a su resistencia a condiciones extremas.
- **Maquinaria y herramientas:** La fabricación de maquinaria industrial y herramientas depende del acero por su durabilidad y capacidad para mantener su forma bajo estrés.

Producción mundial de metales 2022	
Acero	1950 millones de toneladas
Aluminio	67 millones de toneladas
Cobre	24 millones de toneladas
Zinc	13 millones de toneladas

Tabla 2-1. Producción mundial de los principales metales durante el año 2022 (Elaboración propia).

En definitiva, el acero es el metal más producido y consumido a nivel mundial. A continuación se ofrece una comparación de las cifras de producción con otros metales que indican que la producción de acero supera con creces la de otros metales industriales, consolidándose como el material más utilizado en la industria [2].

2.1.1 Introducción histórica

El acero ha sido uno de los materiales clave en el desarrollo de las civilizaciones [18], permitiendo avances tecnológicos y económicos que han marcado la historia de la humanidad. Su importancia radica no solo en sus propiedades mecánicas y versatilidad, sino también en la evolución de sus métodos de producción, que han impulsado procesos industriales y transformaciones sociales. Desde las primeras aleaciones accidentales hasta la sofisticada siderurgia moderna, el acero ha estado en el centro de la innovación y el progreso. A continuación, se ofrece un análisis de los métodos tradicionales y las técnicas industriales y tecnológicas que han permitido su masificación y mejora en calidad.

Los orígenes del acero se remontan a la antigüedad, cuando las primeras civilizaciones comenzaron a trabajar el hierro. Inicialmente, los artesanos utilizaban hornos de baja temperatura conocidos como hornos de reducción, que permitían obtener un hierro forjado de bajo contenido de carbono. La transformación por serendipia del hierro en acero, mediante la introducción de cantidades variables de carbono, fue el primer paso hacia la producción de un material más resistente y maleable.

El denominado "acero de Damasco", famoso por su combinación de dureza y flexibilidad, es un claro ejemplo de estas primeras técnicas. La denominación de acero de Damasco fue dada durante la época de las cruzadas al acero hipereutectoide empleado para la fabricación de espadas de los musulmanes. Este acero contenía un 0,8% de carbono [19]. Estudios recientes empleando composiciones de carbono de entre el 1,4% y 1,6%, han analizado las composiciones microestructurales de estas aleaciones y que tras un minucioso estudio, confirman la alta pericia de los antiguos herreros para controlar la carbonatación del hierro.



Figura 2-1 Daga de acero de damasco [20]

Durante la Edad Media, la introducción de nuevas tecnologías, como el horno de calcinación, permitió optimizar la producción de hierro [21], dando paso a la elaboración de productos de mejor calidad. En este periodo, la técnica del “encañonado” o la producción de “acero de grano” mediante procesos de forja y laminación manual se fue perfeccionando, permitiendo la obtención de herramientas, armas y elementos estructurales fundamentales para la expansión de las ciudades medievales.

Con la llegada del Renacimiento, se produjo una revalorización del conocimiento clásico en todos los ámbitos del conocimiento y de igual manera en el campo de la metalurgia, lo que impulsó el redescubrimiento y la sistematización de técnicas metalúrgicas antiguas. Una de las invenciones que más contribuye a la mejora de los sistemas de producción de acero fue el perfeccionamiento del horno de fundición de mayor temperatura. Esto permitió un control más preciso de la composición del acero y que dio lugar a la producción de “aceros especiales” para aplicaciones específicas en la arquitectura y la industria militar.

El siglo XIX marca un punto de inflexión en la historia del acero. Con la Revolución Industrial se planteó la necesidad de producir acero en grandes cantidades y a menor coste. En 1855, Sir Henry Bessemer desarrolló la patente de un proceso revolucionario basado en la oxidación del hierro líquido para eliminar impurezas y ajustar el contenido de carbono [22]. Este proceso es conocido como el proceso Bessemer-Thomas (ver Figura 2-2) y permitió la producción en masa de acero, reduciendo drásticamente los costos y abriendo nuevas posibilidades en la construcción, la maquinaria y la industria ferroviaria.

Sección de un convertidor Bessemer de 1900

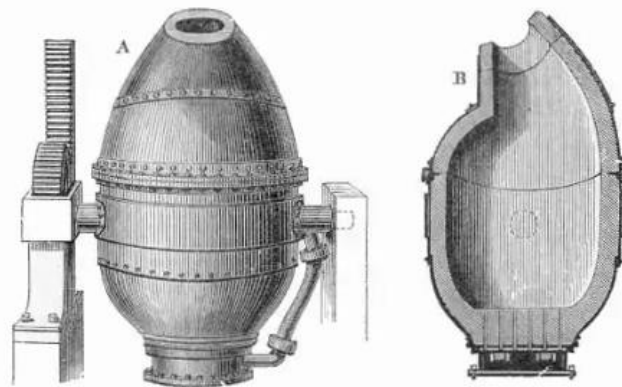


Figura 2-2 Dibujo de la sección de un convertidor Bessemer (tomada de [23])

Este método, al ser capaz de transformar grandes volúmenes de hierro en acero en cuestión de minutos, supuso el inicio de la era moderna de la siderurgia. Su impacto fue tal que marcó la transición de una producción artesanal y local a una producción industrial y global, consolidando a la siderurgia como uno de los pilares de la economía moderna.

Más adelante, el proceso Siemens-Martin o de horno de “cielo abierto”, permitía obtener aceros con composiciones y propiedades más controladas. Aunque el proceso era menos rápido que el Bessemer, ofrecía una mayor flexibilidad para la producción de aceros especiales y de alta calidad [24].

Es en el transcurso del siglo XX que la industria siderúrgica experimenta una serie de transformaciones impulsadas por la automatización y el avance en el control de procesos. La introducción del horno de arco eléctrico (ver Figura 2-3) permitió la fusión de chatarra y la producción de acero reciclado, reduciendo significativamente el consumo de materias primas vírgenes y los costos energéticos [25]. Este método, inicialmente utilizado para la producción de aceros especiales, se fue expandiendo y mejorando gracias a los avances en la electrónica y el control computarizado.

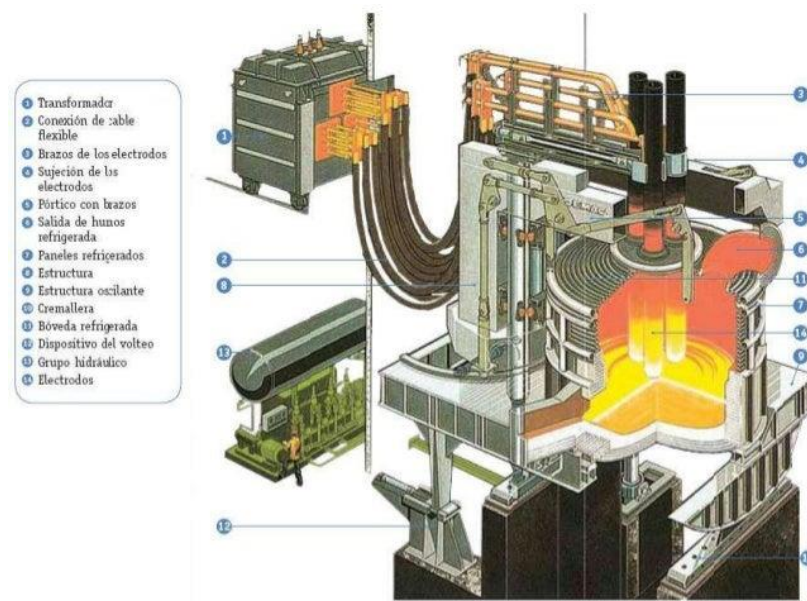


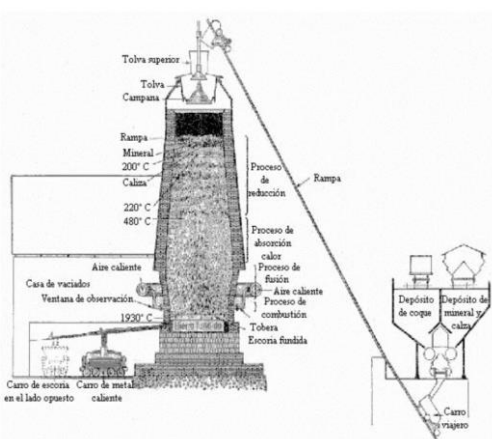
Figura 2-3 Horno de arco eléctrico (tomada de [22])

Simultáneamente, el desarrollo del convertidor básico de oxígeno revolucionó la refinación del acero. Este proceso consiste en soplar oxígeno a alta presión sobre el hierro fundido para reducir el contenido de carbono de forma rápida y eficiente, lo que permitió alcanzar niveles de producción sin precedentes y mejorar la calidad del producto final [26]. Estas innovaciones no sólo incrementaron la productividad, sino que también sentaron las bases para la integración de sistemas de control y monitoreo que hoy en día permiten optimizar cada fase de la producción siderúrgica.

Finalmente y en la actualidad, una de las innovaciones más significativas en las últimas décadas ha sido la implementación de la colada continua, un proceso que elimina etapas intermedias y permite la producción directa de lingotes o placas de acero con calidad homogénea. La colada continua, junto con la automatización y la digitalización de los procesos, ha supuesto una reducción considerable en los tiempos de producción y en el consumo energético, posicionando a la industria del acero en la vanguardia de la manufactura inteligente [27].

2.1.2 Fabricación de acero

La producción de acero se realiza mediante diversos procesos, en los cuales la química desempeña un papel crucial. En este contexto, el estudio de las reacciones químicas que ocurren en cada etapa de la fabricación del acero, así como la implementación de tecnologías innovadoras para optimizar la calidad del producto final y reducir el impacto ambiental, constituye el núcleo de la fabricación de acero.

Procesos Tradicionales de fabricación de acero		
1	Proceso de alto horno	
	 Figura 2-4 Vista seccional de un alto horno (tomada de [28]) Principales reacciones en el alto horno: $C + O_2 \rightarrow CO_2 \text{ (Generación de energía)}$ $CO_2 + C \rightarrow 2CO \text{ (El monóxido de carbono es el principal agente reductor en el alto horno)}$ $3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2 \text{ (Reducción de hematita a magnetita)}$	Este proceso consiste en la reducción del mineral de hierro (generalmente hematitas) mediante la acción de un agente reductor, como el coque, y la adición de fundentes, como la caliza. Las fases del proceso en un alto horno son las siguientes. -Fase de carga: se introducen en el alto horno el mineral de hierro, el coque y la piedra caliza. El mineral de hierro es la materia prima principal, mientras que el coque proporciona el calor necesario para la fusión, y la piedra caliza facilita la eliminación de impurezas. -Fase de reducción: El coque se quema en el horno, alcanzando altas temperaturas que permiten la reducción del mineral de hierro. Durante esta etapa, el oxígeno presente en el mineral reacciona con el carbono del coque, liberando monóxido de carbono. Este gas actúa como agente reductor, ayudando a extraer el hierro del mineral.

	$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2$ (Reducción de magnetita a wüstita (FeO)) $FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2$ (Reducción de wüstita a hierro metálico) $FeO + C \rightarrow Fe + CO$ (Reducción directa de wüstita a hierro metálico) $3Fe + C \rightarrow Fe_3O$ (Formación de arrabio con contenido de carbono entre el 3-4%, para ser utilizable como acero se requiere de un refinamiento en un convertidor)	-Fase de fusión: A medida que el mineral de hierro se reduce, se funde y se convierte en hierro líquido. Este hierro líquido, junto con las impurezas generadas, se acumula en el fondo del alto horno y se extrae de manera periódica. -Refinación: El hierro líquido obtenido se somete a un proceso adicional de refinación para eliminar las impurezas restantes, como el carbono y el azufre, y así obtener el acero deseado. En esta fase se añade oxígeno para eliminar el exceso de acero y que el contenido del mismo sea Durante este proceso, el hierro fundido se obtiene como producto primario, mientras que los gases emitidos, como el dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO), se procesan para recuperar el calor y generar energía.
2	Proceso Bessemer Figura 2-5 Convertidor Bessemer (tomada de [29]) Reacciones presentes en el proceso; comenzamos con la reducción de impurezas: $C + O_2 \rightarrow CO_2$ (Oxidación del carbono) $Si + O_2 \rightarrow SiO_2$ (Oxidación del silicio) $Mn + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow MnO$ (Oxidación del manganeso) $S + CaO \rightarrow CaS + \frac{1}{2}O_2$ (Eliminación del azufre) $4P + 5O_2 \rightarrow 2P_2O_5$ (Oxidación del fósforo)	Este proceso fue revolucionario en su época por su eficiencia y la capacidad de producción. Consiste en soplar aire a través del hierro fundido para eliminar las impurezas y reducir el contenido de carbono. -Carga: En esta fase, se introduce el hierro fundido obtenido del alto horno en un convertidor Bessemer, un gran recipiente de forma cilíndrica. Este hierro fundido contiene impurezas, como carbono, silicio, manganeso, azufre y fósforo, que deben ser eliminadas para producir acero. -Reducción del carbono: Una vez que el hierro fundido está en el convertidor, se sopla aire a alta presión a través del metal fundido. El oxígeno del aire reacciona con el carbono del hierro, formando dióxido de carbono y monóxido de carbono, los cuales se liberan como gases. Este proceso reduce significativamente el contenido de carbono en el hierro fundido, lo que es esencial para obtener acero, ya que el

	$FeO + C \rightarrow Fe + CO$ (Reducción del óxido de hierro)	acero tiene un contenido de carbono mucho más bajo que el hierro fundido. -Eliminación de impurezas: Además de eliminar el carbono, el soplado de aire también reduce otros elementos no deseados, como el silicio y el manganeso, transformándolos en óxidos que se separan del metal en forma de escoria. Sin embargo, algunos elementos, como el fósforo y el azufre, pueden ser difíciles de eliminar completamente en este proceso, lo que limita su uso en ciertos tipos de acero de alta calidad. -Fusión y refinación: A medida que se sopla aire, el hierro fundido se convierte en acero, con un contenido de carbono mucho más bajo. En algunos casos, durante este proceso, se pueden añadir aleaciones como manganeso o cromo para ajustar las propiedades del acero, como su dureza o resistencia a la corrosión. Una vez que se ha alcanzado el contenido de carbono deseado y se han eliminado las impurezas, el acero se vierte en moldes y se deja solidificar, o se somete a otros procesos de conformado, como la laminación en caliente, para obtener el acero en las formas necesarias para su uso en la industria.
Avances en la fabricación de acero		
3	Convertidor de oxígeno	

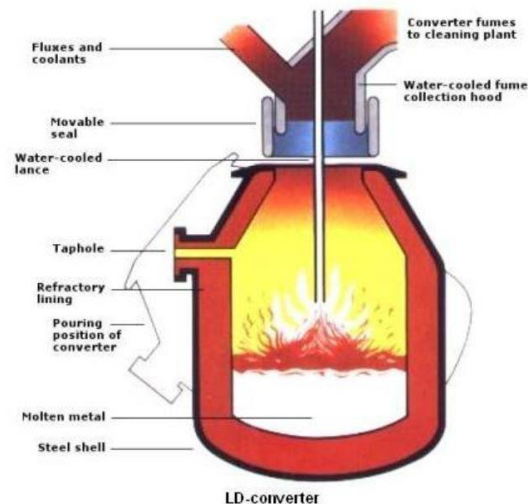
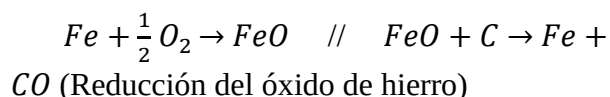
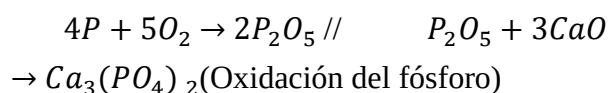
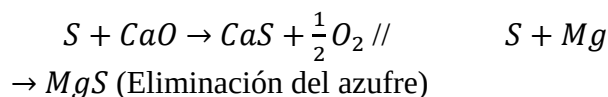
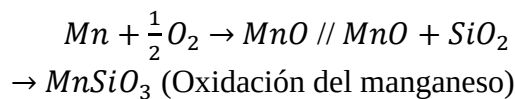
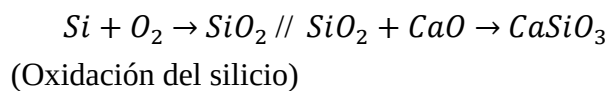
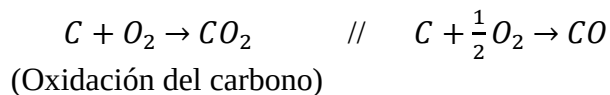


Figura 2-6 partes de un convertidor de oxígeno (tomada de [30])



En este proceso, el oxígeno se inyecta a alta presión en el acero fundido para reducir el contenido de carbono, produciendo acero con mayor pureza y mejores propiedades mecánicas. Este proceso ha sido optimizado continuamente mediante el uso de tecnologías avanzadas de control y monitoreo.

-Carga: Se introduce hierro fundido proveniente del alto horno en un convertidor de oxígeno, que contiene impurezas como carbono, silicio, manganeso, fósforo y azufre.

-Soplado de oxígeno: Se sopla oxígeno puro a alta presión en el convertidor. El oxígeno reacciona con el carbono y otras impurezas, oxidándolas y formando gases (CO_2 y CO), los cuales se liberan. Esto reduce el contenido de carbono del hierro fundido, convirtiéndolo en acero.

-Eliminación de impurezas: Las impurezas como el silicio y el fósforo se convierten en óxidos que se combinan con la cal, formando una escoria que se retira.

-Ajuste de composición: Se pueden añadir aleaciones como manganeso, cromo o níquel para ajustar las propiedades del acero.

-Finalización: Una vez alcanzado el contenido de carbono deseado y eliminadas las impurezas, el acero se vierte en moldes para enfriarse y solidificarse, obteniendo acero de alta calidad.

4

Colada continua

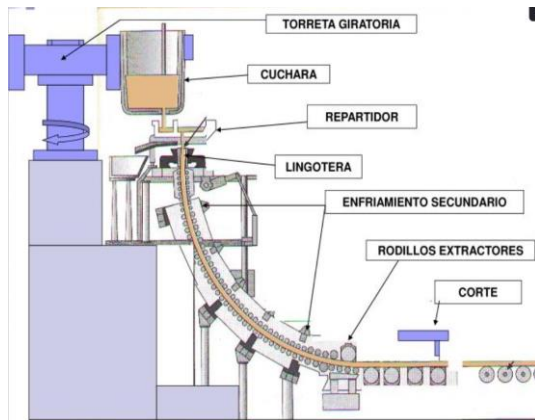


Figura 2-7 Proceso de solidificación de acero por colada continua (tomada de [31])

Esta técnica permitió eliminar etapas intermedias en la producción de acero, como la fundición de lingotes. La colada continua consiste en la solidificación del acero fundido en una cadena de moldes refrigerados, formando directamente placas o bobinas de acero

-Carga: El acero líquido proveniente del convertidor de oxígeno o el horno eléctrico se vierte en una máquina de colada continua.

-Solidificación inicial: El acero líquido se introduce en un molde de refrigeración por agua, donde comienza a solidificarse en una capa externa, formando una especie de "costra" mientras el interior sigue siendo líquido.

-Extrusión continua: El acero parcialmente solidificado se extrae del molde y se pasa a través de una serie de rodillos de compresión que siguen dando forma y enfriando el metal. A medida que avanza, la parte exterior se solidifica completamente mientras que el interior sigue siendo líquido hasta que se enfría por completo.

-Corte y conformado: El acero solidificado se corta en longitudes deseadas para obtener productos como lingotes, planchas, barras o bobinas. Luego, se pueden someter a tratamientos adicionales como laminado en caliente o en frío.

Innovaciones recientes

1

Monitoreo y control en tiempo real

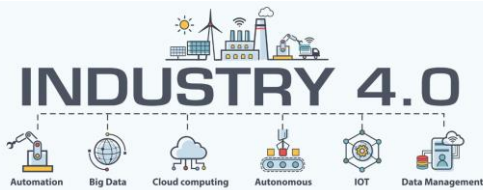
	 Figura 2-8 Monitoreo a tiempo real en el ámbito de la siderurgia (generada mediante inteligencia artificial)	Los avances en sensores y tecnología de monitoreo permiten el análisis en tiempo real de parámetros clave como la temperatura, la composición química y la viscosidad del acero fundido. Este monitoreo preciso permite optimizar la cantidad de reactivos utilizados, reducir el consumo energético y mejorar la calidad del producto final.
2	Inteligencia artificial y aprendizaje automático	
	 Figura 2-9 Robot tesla que representa el aprendizaje automático (tomada de [32])	El uso de algoritmos de inteligencia artificial (IA) en la optimización de procesos se ha expandido en la industria del acero. Estos algoritmos pueden predecir y ajustar las condiciones de los hornos, mejorar la eficiencia de los procesos de colada continua y minimizar el desperdicio de materiales.
3	Internet de las cosas	
	 Figura 2-10 Interconexión en la industria 4.0 gracias al IoT (Tomada de [33])	La implementación del internet de las cosas (IoT) en la fabricación de acero ha permitido la integración de equipos y sistemas de monitoreo en una red conectada. Los datos recolectados de todos los procesos se analizan para realizar ajustes en tiempo real, lo que mejora la eficiencia de la producción y reduce los costos operativos.

Tabla 2-2 Fabricación de acero; procesos e innovaciones de la industria metalúrgica. Fuentes: [18], [22], [25], [28], [29], [30] (elaboración propia)

2.1.3 Uso en las fuerzas armadas

El acero es un material fundamental en el ámbito militar, a lo largo de la historia de la humanidad, el uso de este metal con fines bélicos ha sido y es ampliamente extendido. La popularidad de este metal en su uso en el ámbito de las fuerzas armadas es debida a su resistencia, versatilidad y capacidad de adaptación a diferentes entornos lo convierten en un recurso esencial en la fabricación de vehículos, armamento e infraestructuras militares. Además, tal y como se ha discutido anteriormente, la facilidad

de conformado y fabricación de este metal así como su reducido coste, contribuyen a fomentar su uso en estos campos.

En las fuerzas armadas españolas encontramos numerosos ejemplos del uso de acero en la fabricación tanto de vehículos como herramientas.

En primer lugar, el acero desempeña un papel crucial en la industria de la defensa española, especialmente en la construcción de vehículos blindados. Ejemplos de ello son el VCR 8x8 "Dragón" cuyo contrato sigue suponiendo una gran inversión para defensa [38] y el carro de combate Leopard 2E, ambos utilizados por el Ejército de Tierra. La resistencia del acero balístico empleado en estos vehículos proporciona una protección óptima contra impactos y explosivos, garantizando la seguridad de la tripulación en operaciones militares [39]. Estos aceros se encuentran además en estos casos tratados con pinturas especiales de reducción de firma infrarroja para contribuir a la furtividad de las unidades.

Asimismo, la Armada Española emplea acero naval de alta resistencia en la fabricación de buques de guerra, submarinos y otras embarcaciones. Navantia, una de las principales empresas de construcción naval en España, utiliza acero en la construcción de fragatas [40] como las F-110 [41] y los nuevos submarinos de la serie S-80 [42]. Y es que, este material no solo otorga solidez estructural, sino que también contribuye a la durabilidad y operatividad de los navíos en condiciones extremas y en un medio altamente corrosivo como es el mar.

En el ámbito de la ingeniería militar, más en concreto en unidades de zapadores, el acero se usa en la construcción de puentes como los tipo Mabey [43], búnkeres y fortificaciones. La resistencia del acero estructural permite la creación de infraestructuras capaces de soportar grandes cargas y resistir condiciones adversas. También, la posibilidad de crear estructuras altamente resistentes y ligeras, contribuye a la versatilidad de movilidad para el empleo de estas estructuras en diferentes entornos y situaciones tácticas. Además, en el desarrollo de bases militares y aeropuertos estratégicos, el acero es fundamental para garantizar la estabilidad de las estructuras.

El armamento es otra área en la que el acero es un elemento esencial. La fabricación de cañones, fusiles y proyectiles requiere acero de alta calidad para garantizar precisión y resistencia al desgaste. Empresas españolas como Santa Bárbara Sistemas han utilizado este material en la producción de armamento para las Fuerzas Armadas, asegurando así su eficacia en combate de acuerdo con los artículos [38, 44, 45].

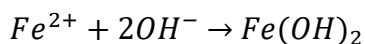
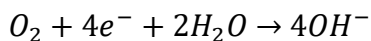
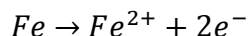
Por último, el acero también es clave en el desarrollo de nuevas tecnologías militares, como la investigación de materiales avanzados que combinan acero con aleaciones ligeras para mejorar la movilidad y eficiencia de los equipos. La innovación en este campo permite mejorar la protección de los soldados y la efectividad de las misiones. Un ejemplo de ello son las nuevas armaduras compuestas modulares diseñadas por la empresa alemana IBD Deisenroth Engineering [46].

En conclusión, el acero sigue siendo un pilar fundamental para las Fuerzas Armadas Españolas. Su uso en vehículos, infraestructuras y armamento demuestra su importancia estratégica en la defensa y seguridad del país.

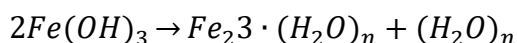
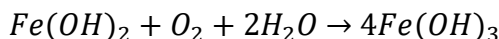
2.2 El proceso de oxidación

El acero, a pesar de su resistencia y versatilidad, no es inmune al paso del tiempo ni a la acción de los elementos. Su oxidación es un fenómeno natural que ocurre cuando el hierro, su principal componente, entra en contacto con el oxígeno y la humedad del aire. Este proceso da lugar a la formación de óxido de hierro, más conocido como herrumbre ($Fe_2O_3 \cdot (H_2O)_n$), una sustancia que no solo altera la apariencia del metal volviéndolo de un color marrón rojizo, sino que también compromete su integridad estructural y mecánica.

Desde un punto de vista químico, la oxidación del hierro sigue una serie de reacciones bien definidas. Inicialmente, el hierro metálico cede electrones al oxígeno en presencia de agua, lo que da lugar a la formación de hidróxido de hierro según la ecuación:



Con el tiempo, este hidróxido de hierro sufre un proceso de deshidratación y se convierte en óxido de hierro hidratado:



La velocidad a la que ocurre este deterioro depende de varios factores ambientales. En regiones con alta humedad o en entornos expuestos a la brisa marina, la presencia de cloruro de sodio acelera la corrosión al generar pequeñas diferencias de potencial sobre la superficie del metal. Asimismo, en áreas industriales, la contaminación atmosférica, con compuestos como el dióxido de azufre (SO₂) o el dióxido de carbono (CO₂), favorece la formación de ácidos débiles que intensifican el proceso corrosivo[47].

Para frenar o mitigar la oxidación del acero, se han desarrollado diversas estrategias. Un método ampliamente utilizado es la aplicación de recubrimientos protectores, como pinturas o barnices, que actúan como una barrera contra la humedad y el oxígeno. Otro enfoque es el galvanizado, donde una capa de zinc protege al acero al actuar como un ánodo de sacrificio, evitando que el hierro subyacente se oxide. En aplicaciones más exigentes, se recurre al acero inoxidable, que incorpora cromo en su composición. Este elemento forma una fina película de óxido de cromo (Cr₂O₃) en la superficie, proporcionando una protección pasiva contra la corrosión [7].

La oxidación del acero no es solo un desafío material, sino también un problema económico y de seguridad. En sectores como la construcción, la automoción o la industria naval, prevenir la corrosión es crucial para garantizar la longevidad de infraestructuras y equipos, evitando costosos mantenimientos o, en el peor de los casos, fallos estructurales que podrían poner en riesgo vidas humanas.

2.3 Técnicas de protección frente a la oxidación

Para proteger el acero de la corrosión, se han desarrollado diversas estrategias que buscan minimizar su exposición a los agentes que desencadenan la oxidación. Uno de los métodos más utilizados es la aplicación de recubrimientos protectores, como pinturas, barnices o películas plásticas, que actúan como una barrera física contra la humedad y el oxígeno, principales responsables del deterioro del metal.

Otra técnica ampliamente empleada es la galvanización, un proceso en el que el acero se recubre con una capa de zinc, ya sea mediante inmersión en caliente o por electrólisis. Este recubrimiento no solo aísla el material subyacente, sino que también cumple una función de protección catódica, ya que el zinc, al ser más reactivo, se oxida antes que el hierro, preservando la estructura del acero durante más tiempo.

Los tratamientos químicos también desempeñan un papel crucial en la lucha contra la corrosión. La pasivación, por ejemplo, promueve la formación de una delgada capa de óxido en la superficie del acero inoxidable, que impide la progresión de la oxidación. El fosfatado, por su parte, genera una capa que mejora la adherencia de pinturas y lubricantes, proporcionando una protección adicional contra la humedad y otros agentes corrosivos.

Además, la elección del tipo de acero influye significativamente en su resistencia a la corrosión. Las aleaciones con cromo, níquel o molibdeno, como los aceros inoxidables, tienen la capacidad de formar de manera natural una capa protectora que reduce drásticamente la susceptibilidad del material al deterioro.

En el ámbito de la protección electroquímica, la protección catódica se ha convertido en una solución eficaz, especialmente en estructuras sumergidas o enterradas. Este método puede aplicarse a través de ánodos de sacrificio, hechos de zinc o magnesio, que se oxidan en lugar del acero, o mediante corriente impresa, en la que una fuente externa suministra electrones para evitar la pérdida de material [7].

Por último, la gestión del entorno juega un papel fundamental en la prevención de la corrosión. Controlar la humedad con el uso de desecantes, evitar la exposición a atmósferas con alta salinidad o ajustar el pH de ciertos entornos industriales puede marcar la diferencia en la durabilidad de las estructuras de acero.

La elección del método de protección más adecuado depende del uso previsto y de las condiciones específicas a las que estará sometido el acero. En muchos casos, la combinación de varias técnicas como en el caso del fosfatado o del niquelado, permite maximizar la vida útil del material y garantizar su desempeño a largo plazo.

2.4 Tratamientos superficiales

En vistas de las diferentes técnicas de protección frente a la corrosión que existen, a continuación se desarrollan cada uno de los tratamientos superficiales que se les aplicará a las probetas del proyecto. Estos tratamientos son ampliamente empleados en la industria y constituyen una parte fundamental para la protección contra la corrosión de los metales.

2.4.1 Fosfatado

2.4.1.1 Introducción histórica

El fosfatado es un tratamiento superficial del metal que ha evolucionado a lo largo del tiempo hasta convertirse en una técnica esencial en múltiples sectores industriales. Se cree que era utilizado por los romanos en el siglo III pero no fue hasta finales del siglo XIX, cuando se descubrió que ciertos ácidos fosfóricos podían generar capas protectoras sobre superficies metálicas, mejorando su resistencia a la corrosión y su capacidad de adherencia a recubrimientos. Sin embargo, fue durante la Primera y la Segunda Guerra Mundial cuando su aplicación cobró una especial relevancia. En un contexto bélico, donde la producción masiva de armamento y vehículos militares requería materiales más duraderos y resistentes al desgaste, el fosfatado se convirtió en un proceso clave para mejorar la protección del acero sin necesidad de recurrir a costosos tratamientos adicionales [48].

Hoy en día, esta técnica se emplea en una amplia gama de industrias, desde la automoción hasta la fabricación de electrodomésticos, pasando por la construcción y la maquinaria pesada. Su capacidad para prevenir la corrosión y mejorar la adhesión de pinturas y lubricantes lo convierte en un método indispensable en entornos donde los metales están sometidos a condiciones extremas de humedad y temperatura. En la industria automotriz, por ejemplo, el fosfatado se utiliza en la preparación de carrocerías y componentes metálicos antes de la aplicación de recubrimientos, asegurando una mayor durabilidad y resistencia. Del mismo modo, en el sector de la defensa, se emplea en la protección de armas y equipamiento táctico, prolongando su vida útil en condiciones adversas [49].

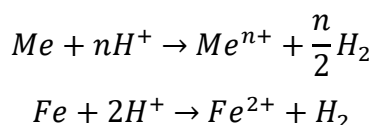
Existen varios métodos de fosfatado, cada uno con características específicas según el tipo de protección que se busca obtener. El fosfatado de zinc, por ejemplo, es uno de los más utilizados debido

a su eficacia en la prevención de la corrosión, especialmente en combinación con aceites o ceras protectoras. El fosfatado de manganeso, por otro lado, es ideal para aplicaciones donde se requiere una alta resistencia al desgaste y una mejor lubricación, como en engranajes y componentes de transmisión. Finalmente, el fosfatado de hierro, aunque menos resistente, es una opción económica y adecuada para mejorar la adherencia de pinturas en superficies metálicas.

Lejos de ser un procedimiento estático, el fosfatado sigue evolucionando con la incorporación de nuevas formulaciones químicas y procesos más sostenibles. La reducción del impacto ambiental y la optimización del rendimiento siguen siendo prioridades en la investigación y desarrollo de este tratamiento, garantizando su relevancia en la industria moderna.

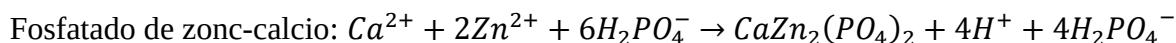
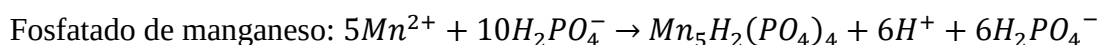
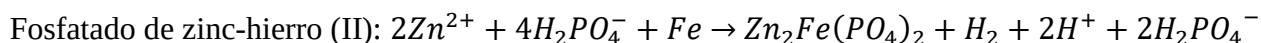
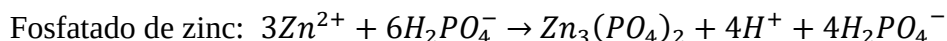
2.4.1.2 Química del fosfatado

Durante el proceso, el metal se sumerge en una disolución fosfatante y se produce el intercambio entre la superficie del metal y los agentes presentes en la solución acuosa. El ataque químico que sufre la pieza sigue la siguiente reacción [48]:



El proceso de fosfatado finaliza cuando sobre la superficie del metal sumergido se ha formado una película de fosfato cristalino. Esta película suele contar con un espesor de en torno a 1-3µm.

Existen varios tipos de fosfatado atendiendo a la composición química de los elementos presentes en los baños de fosfato. Cada una de ellas ofrece características diferentes dependiendo del uso que se les vaya a dar. Las reacciones más significativas de los diferentes métodos de fosfatado se muestran a continuación:



2.4.2 Cataforesis

2.4.2.1 Introducción histórica

La cataforesis, también conocida como electrodeposición catódica, tiene sus orígenes en un fenómeno descubierto a principios del siglo XIX por el científico ruso Ferdinand Friedrich Reuss [50]. En sus experimentos, Reuss observó que las partículas suspendidas en un líquido se desplazaban cuando se aplicaba un campo eléctrico, lo que marcó el inicio de la electroforesis. Con el tiempo esto se convirtió en la base de diversas aplicaciones prácticas. A mediados del siglo XX esta propiedad comenzó a utilizarse en la industria, especialmente en la búsqueda de soluciones más eficaces para el recubrimiento de metales. En la década de 1960, el sector automotriz, enfrentándose al desafío de proteger las

carrocerías contra la corrosión, adaptó este principio para desarrollar un método innovador: un sistema que permitía aplicar pintura de manera uniforme a través de un proceso eléctrico. Este avance no solo garantizaba una cobertura homogénea, incluso en los rincones más inaccesibles de las piezas metálicas, sino que también mejoraba notablemente la resistencia y durabilidad de los vehículos [51].

Con el tiempo, este tipo de electrodeposición trascendió el ámbito automotriz y se convirtió en una técnica imprescindible en múltiples industrias. Desde la construcción naval hasta la fabricación de electrodomésticos, pasando por la maquinaria agrícola y la infraestructura metálica, este proceso se consolidó como una solución versátil y eficiente [52]. Su principal atractivo radica en la combinación de calidad y sostenibilidad: al permitir una distribución uniforme de la pintura y minimizar el desperdicio, reduce el impacto ambiental sin comprometer el rendimiento. Además, su capacidad para reutilizar el material no adherido lo convierte en un método económicamente optimizado, disminuyendo costos de producción y mejorando la eficiencia general. A medida que la tecnología avanza y las formulaciones de pintura se perfeccionan, la cataforesis sigue evolucionando, afianzándose como una de las técnicas más fiables para la protección de superficies metálicas.

2.4.2.2 Química de la cataforesis

La pintura de cataforesis está formada por una dispersión de resinas y pigmentos con un contenido de disolventes orgánicos inferior al 4% y cuyos componentes son: un ligante catiónico que es una resina generalmente epoxi o acrílica nitrogenada con un ácido orgánico para solubilizar, agua desmineralizada con una conductividad menor a 10 us/cm y pasta pigmentada obtenida de la molienda de pintura epoxi del mismo tipo que el ligante. Además de los pigmentos, se emplean disolventes como Butiglicol y catalizadores de polimerización.

Las reacciones químicas de este proceso son las siguientes:

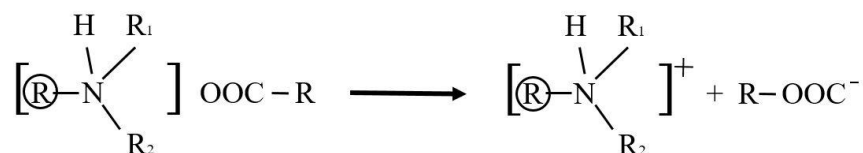


Figura 2-11 Disociación de la molécula de pintura provocada por la aplicación de corriente continua (tomada de [48])

Reacciones en el cátodo: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^- + \text{H}_2$

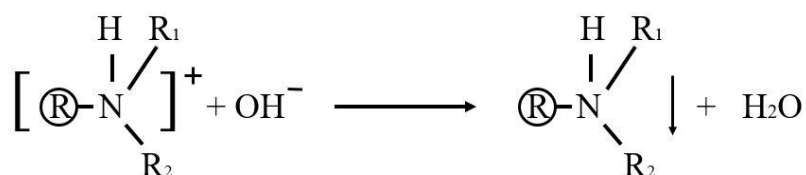


Figura 2-12 Coagulación de la pintura (tomada de [48])

Reacción en el ánodo de electrólisis del agua: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

Reacción en el ánodo de neutralización del ácido: $[R - COO]^- + H^+ \rightarrow R - COOH$

2.4.3 Pavonado

2.4.3.1 Introducción histórica

El pavonado es un proceso de acabado superficial que ha acompañado al ser humano desde hace siglos, especialmente en la manufactura de armas y herramientas metálicas. Su origen se encuentra en la observación de un fenómeno natural: cuando el acero se calienta a ciertas temperaturas, adquiere tonalidades azuladas o negruzcas debido a la formación de óxidos en su superficie. Lo que en un principio pudo parecer un simple cambio de color, con el tiempo se convirtió en una técnica perfeccionada para proteger el metal de la corrosión y mejorar su apariencia. En los talleres de armeros del siglo XIX, el pavonado se estableció como un estándar para el tratamiento de cañones y mecanismos, proporcionando no solo resistencia a la oxidación sino también un acabado elegante y discreto [13].

A lo largo de los años, esta técnica ha evolucionado en distintos métodos, desde el pavonado en caliente, basado en la inmersión del acero en soluciones químicas a alta temperatura, hasta el pavonado en frío, más accesible y utilizado para pequeños retoques.

Su atractivo radica en su simplicidad y eficacia: en lugar de aplicar un recubrimiento externo, el proceso reacciona directamente con la superficie del metal, generando una capa protectora integrada. Aunque su resistencia no alcanza la de otros tratamientos modernos como la anodización o el nitrurado, el pavonado sigue siendo ampliamente utilizado en la industria armamentística, en la restauración de piezas antiguas y en la protección de herramientas. Su encanto no es solo funcional, sino también estético: ese tono oscuro, profundo y mate que confiere al acero lo convierte en un acabado tan icónico como útil, una muestra de cómo la interacción entre la química y la tradición sigue vigente en la metalurgia moderna [53].

2.4.3.2 Química del pavonado

El pavonado es un proceso químico que implica la formación de una capa delgada de óxido en la superficie del acero, conocida como magnetita (Fe_3O_4). Esta capa forma una barrera protectora y evita la aparición de corrosión sobre la superficie del metal.

Estas son las reacciones más comunes en baño caliente del pavonado:

Formación del hidróxido de hierro: $Fe^{2+} + 2OH^- \rightarrow Fe(OH)_2$

Reacción de oxidación a magnetita: $3Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow Fe_3O_4 + 3H_2O$

2.4.4 Cobreado

2.4.4.1 Introducción histórica

El cobreado es una técnica que ha perdurado a lo largo de los siglos, conocida tanto por sus propiedades funcionales como estéticas. Desde las primeras civilizaciones, donde el cobre era un metal valioso, se descubrió que al aplicarlo sobre otras superficies metálicas, no solo se conseguía una protección frente a la corrosión, sino también un brillo y color inconfundibles. En sus orígenes, el proceso de cobreado era un arte manual, realizado mediante la aplicación directa de cobre o mediante baños en soluciones especiales. Sin embargo, fue durante la Revolución Industrial cuando esta técnica comenzó a tomar un nuevo rumbo, ganando en precisión y extendiendo su uso a una variedad más amplia de aplicaciones. En ese momento, el cobreado dejó de ser solo una manera de embellecer, para

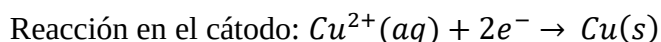
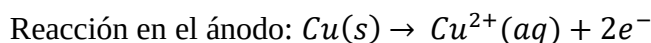
convertirse en una solución práctica que protegía herramientas, piezas de maquinaria y objetos decorativos de los efectos del tiempo y el desgaste, asegurando su durabilidad.

A lo largo de los siglos, el cobreado ha sufrido una evolución que ha dejado atrás la simple aplicación manual para dar paso a técnicas mucho más sofisticadas.

Actualmente, el método de electrodeposición se ha consolidado como uno de los más comunes, utilizando corriente eléctrica para depositar una capa fina y uniforme de cobre sobre una base metálica. Este proceso no solo es más preciso, sino que ha permitido que el cobreado se adentre en sectores como la electrónica, la automoción y la creación de objetos ornamentales. Aunque existen otras alternativas como el niquelado o el galvanizado, el cobreado sigue siendo muy apreciado por su versatilidad. Su capacidad para ofrecer una capa resistente a la corrosión, además de su acabado cálido y visualmente atractivo, mantiene su relevancia, tanto en el ámbito industrial como en el artístico [54].

2.4.4.2 Química del cobreado

En el proceso de cobreado, el cobre metálico del electrodo se disuelve al funcionar éste como ánodo y este cobre desprendido se deposita sobre la pieza a cobrear en el cátodo. La reacción global del proceso es una oxidación reducción cuyo ciclo es continuo:



2.4.5 Niquelado

2.4.5.1 Introducción histórica

El niquelado ha sido una técnica clave en la metalurgia durante más de un siglo, destacándose por su capacidad para aportar durabilidad y un acabado estéticamente atractivo a una amplia variedad de materiales.

Originado en el siglo XIX, este proceso comenzó como una solución para combatir la corrosión de metales expuestos a condiciones adversas, aprovechando las propiedades naturales del níquel. A medida que se perfeccionó con el tiempo, especialmente tras el impulso de la Revolución Industrial, el niquelado pasó de ser un proceso rudimentario a convertirse en una técnica de precisión, empleando la electroquímica para crear recubrimientos finos y uniformes. Con el tiempo, la aplicación del níquel se extendió a sectores industriales, mejorando no solo la resistencia de herramientas y maquinaria, sino también otorgando un acabado brillante que le confería un toque de sofisticación.

En la actualidad, el niquelado se ha adaptado a numerosas aplicaciones, gracias a los avances en los métodos de electrodeposición.

Más allá de su función protectora, el niquelado se valora por su capacidad de ofrecer un acabado brillante y reflejante, algo que no solo aumenta su atractivo visual, sino que también mejora la conductividad y resistencia del metal tratado. El niquelado sigue siendo una técnica apreciada por su versatilidad, su durabilidad y la estética [54].

2.4.5.2 Química del niquelado

Es necesario tener en cuenta que el niquelado, suele ser un tratamiento secundario, entendiendo esto como que, por norma general, las piezas a tratar no son el metal puro sino que ha sufrido algún

tratamiento previo. En el caso de este proyecto, el tratamiento previo también típico en industria, ha sido un cobreado electrolítico.

El niquelado electrolítico es un proceso de recubrimiento en el cual se deposita una capa de níquel sobre una pieza metálica utilizando una corriente eléctrica. En este proceso, el sustrato actúa como el cátodo, mientras que el ánodo está compuesto generalmente por níquel metálico. Además, para asegurar la buena eficiencia y acabado, se emplea una solución electrolítica que contiene sales de níquel, como el sulfato de níquel (NiSO_4) que, al tener Ni^{2+} en disolución en el electrolito, se va a adherir también a la pieza a niquelar facilitando la transmisión de electrones entre ellos [54].

Reacción en el ánodo: $\text{Ni}(s) \rightarrow \text{Ni}^{2+}(aq) + 2e^-$

Reacción en el cátodo: $\text{Ni}(aq) + 2e^- \rightarrow \text{Ni}(s)$

2.4.6 Zincado

2.4.6.1 Introducción histórica

El zincado, como técnica de recubrimiento, tiene sus raíces a principios del siglo XIX, cuando se descubrió el potencial del zinc para proteger otros metales de los efectos corrosivos del tiempo y el entorno. Este metal, resistente por naturaleza a la oxidación, comenzó a aplicarse sobre materiales más vulnerables como el hierro y el acero, que, expuestos a la humedad o ambientes adversos, se desgastan con facilidad.

El proceso es simple pero eficaz: al depositar una capa delgada de zinc sobre la superficie metálica, se crea una barrera que impide que el oxígeno y la humedad entren en contacto directo con el metal base, protegiéndolo del deterioro [55].

En sus orígenes, el zincado se realizaba mediante técnicas relativamente sencillas, como el galvanizado en caliente, en el que las piezas se sumergían en un baño de zinc fundido. Con el paso de los años, sin embargo, el proceso fue perfeccionado y adaptado, dando lugar a métodos más avanzados como el galvanizado electrolítico. Esta evolución permitió obtener recubrimientos más finos y controlados, adecuados para aplicaciones más exigentes.

En la actualidad el zincado es una técnica esencial en industrias tan diversas como la construcción, la automotriz y la fabricación de electrodomésticos debido a su capacidad de protección contra la corrosión y la versatilidad de los diferentes métodos que existen.

2.4.6.2 Química del zincado

El zincado electrolítico es un proceso de electrodeposición en el que se aplica una capa de zinc metálico (Zn) sobre una pieza de acero para mejorar su resistencia a la corrosión. Esto se logra sumergiendo la pieza en el electrolito previamente preparado que contiene disueltos iones de zinc (Zn^{2+}) y aplicando una corriente eléctrica.

En este sistema, el acero actúa como el cátodo conectado al polo positivo de la fuente y donde ocurre la reducción del zinc, mientras que un electrodo de zinc actúa como el ánodo. En él, el zinc se oxida y libera iones a la solución que se irán adhiriendo a la pieza con el tiempo [55].

Reacción en el ánodo: $\text{Zn}(s) \rightarrow \text{Zn}^{2+}(aq) + 2e^-$

Reacción en el cátodo: $Zn(aq) + 2e^- \rightarrow Zn(s)$

2.4.7 Pintado

2.4.7.1 Introducción histórica

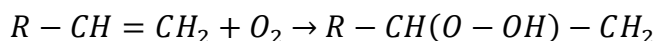
Los orígenes del pintado como técnica de recubrimiento de metales se puede remontar a tiempos antiguos, cuando las primeras civilizaciones descubrieron que recubrir superficies metálicas con sustancias resinosas o aceitosas podía ayudar a prevenir su deterioro. Sin embargo, fue en el siglo XIX, con la Revolución Industrial y el auge de la producción de acero y hierro, cuando el pintado de metales se consolidó como una técnica clave en la protección contra la corrosión. El proceso de aplicar una capa de pintura actúa como una barrera física, aislando el metal del agua, el oxígeno y otros factores ambientales que aceleran el desgaste [56].

Con el tiempo, esta técnica se fue perfeccionando y diversificando, adaptándose a las necesidades de cada industria. Hoy en día, el pintado de metales para evitar la corrosión se realiza a través de diferentes métodos, como el pintado electrostático o el uso de pinturas especialmente formuladas para resistir condiciones extremas. Los avances en las formulaciones de pinturas, que incluyen compuestos antioxidantes y de alto rendimiento, han permitido que este método sea mucho más eficaz y duradero que en sus inicios. Actualmente, el pintado de metales sigue siendo una de las soluciones más accesibles y efectivas en sectores como la construcción, la automoción y la fabricación de maquinaria. Gracias a su capacidad para crear una barrera protectora sólida, esta técnica sigue siendo esencial para prolongar la vida útil de las estructuras metálicas y garantizar su resistencia frente a la corrosión.

2.4.7.2 Química del pintado

Con el pintado, al contrario que en los anteriores tratamientos, se busca crear una capa protectora que evite el contacto del metal a proteger con el oxígeno y evitar así la aparición de corrosión en la pieza a tratar.

Dependiendo del tipo de pintura que se emplee, ésta va a contar con una serie de reacciones químicas u otras. En este caso, la pintura empleada es del tipo alquídica en aerosol. La reacción más común de este tipo de pinturas se da con el secado de la misma, en la que reaccionando con el oxígeno crea la capa protectora que evitará el contacto directo entre el acero y el oxígeno u otros agentes corrosivos.



3 DESARROLLO DEL TFG

Una vez se ha demostrado la necesidad de empleo de tratamientos superficiales para alargar la vida útil de estructuras, piezas o herramientas de acero, se procede a desarrollar los acabados superficiales objetivo de estudio de este documento.

Cada uno de los métodos existentes, ofrece unas características tanto funcionales como estéticas diferentes que serán analizadas a continuación en cada uno de los apartados propios de los tratamientos.

Los acabados superficiales que van a ser estudiados a continuación son: fosfatado de manganeso, pavonado en frío con líquido comercial, pavonado con aerosol Tecnanblue™, cobreado electrolítico, niquelado electrolítico, zincado con aerosol y pintado con aerosol. Las piezas de acero corresponden a un acero de clase normal con un contenido de carbono inferior al 1% de 18 cm² de superficie y 0,2 cm de espesor.

Estos acabados se van a someter a 5 ambientes diferentes por lo que se realizarán las siguientes probetas reflejadas en la Tabla 3-1.

Tratamientos superficiales								
	Fosfatado de manganeso	Fosfatado con cataforesis	Pavonado en frío con líquido comercial	Pavonado con aerosol Tecnanblue™	Cobreado electrolítico	Niquelado electrolítico	Zincado en frío	Pintado con aerosol
Nº de piezas	6	6	6	6	6	6	6	6

Nº Total de tratamientos	48
--------------------------	----

Tabla 3-1. Tratamientos superficiales y piezas a realizar (Elaboración propia)

Para realizar los diferentes acabados superficiales, es necesaria una preparación común a todas las piezas. Ésta consiste en los siguientes pasos que se detallan a continuación.

En primer lugar, se limpia la superficie de las planchas originales de acero y se procede a realizar el pulido de las mismas (ver Figura 3-2 y Figura 3-3). A continuación, con el objetivo de reducir las superficies a tratar y poder disponer de una mayor cantidad de muestras para colocar en los diferentes ambientes, se cortan las planchas de acero en piezas más pequeñas (ver Figura 3-3). Seguidamente, y para finalizar con la preparación, se limpia la superficie con acetona para evitar que quede polvo metálico



Figura 3-1 Estado original de las planchas de acero previo al pulido (elaboración propia)



Figura 3-2 Pulido de planchas de acero (elaboración propia)

o cualquier impureza y las piezas que no vayan a ser inmediatamente después tratadas con alguno de los acabados superficiales, se almacenan en aceite para evitar que comience a aparecer corrosión en la superficie del acero pulido.



Figura 3-3 Cortado de piezas (elaboración propia)

3.1 Fosfatado de manganeso

El fosfatado es un tratamiento químico de superficies metálicas que forma una capa de fosfato sobre el material base. Esta capa protege contra la corrosión, mejora la adherencia de recubrimientos y reduce el desgaste en piezas sometidas a fricción. Se usa en la industria automotriz, metalúrgica y de maquinaria por sus beneficios en durabilidad y resistencia.

Existen varios tipos de fosfatado cuya apariencia visual es muy similar predominando un tono negro grisáceo y un acabado poroso y aterciopelado al tacto.

- Fosfatado de zinc: Prioriza la protección contra la corrosión y sirve como base para pinturas y recubrimientos. Es común en la industria automotriz y componentes expuestos a ambientes agresivos.
- Fosfatado de hierro: Más económico, mejora la adhesión de pinturas y recubrimientos, aunque su resistencia a la corrosión es menor.
- Fosfatado de manganeso: Destacado por su resistencia al desgaste y capacidad de lubricación. Forma una capa que reduce la fricción entre piezas, ideal para motores, engranajes y armas de fuego.

En concreto, el método empleado en el contexto de este proyecto, es el fosfatado de manganeso. Este tratamiento es clave en aplicaciones mecánicas donde se requiere reducir la fricción y mejorar la lubricación. Su estructura rugosa permite una mejor retención de lubricantes, lo que prolonga la vida útil de las piezas en movimiento. Se aplica sumergiendo las piezas en una solución caliente de fosfato de manganeso con un agente oxidante, lo que genera una capa uniforme y adherente. Generalmente, la capa fosfatada es rugosa, mejorando la adhesión de recubrimientos. Su espesor oscila entre unas pocas micras¹ hasta 50 micras. Además, su porosidad facilita la retención de lubricantes y recubrimientos protectores, aumentando la resistencia a la corrosión.

En conclusión, el fosfatado es un tratamiento clave en la industria metalmecánica para mejorar la resistencia a la corrosión, la adhesión de recubrimientos y la lubricación de piezas en fricción. En particular, el fosfatado de manganeso es esencial en aplicaciones de alto desgaste, donde la reducción de fricción y la protección de superficies metálicas son fundamentales para el rendimiento y durabilidad de los componentes.

¹ Micra (μm): unidad de longitud que equivale a 10^{-6}m

3.1.1 Fosfatado de manganeso

Para la realización de este método, se han empleado los siguientes componentes:

Componentes	
Agua destilada	2 l
Ácido Fosfórico	50 g
Óxido de Manganeso	30 g
Estufa de gas portátil	
Cazuela de acero inoxidable	
Medios de protección personal (gafas y guantes)	

Tabla 3-2 Material necesario para realizar el fosfatado de manganeso (elaboración propia).



Figura 3-4 Ácido Fosfórico H_3PO_4 (elaboración propia)



Figura 3-5 Óxido de manganeso MnO_2 (elaboración propia)

Este proceso resulta muy económico y sencillo ofreciendo unos acabados de buena calidad y aspecto, además, es válido para una amplia gama de piezas de diferentes tamaños y formas. Se aplica de forma uniforme en toda la superficie.

3.1.2 Desarrollo del proceso

Se vierte en la cazuela de acero inoxidable el agua destilada se diluyen el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el óxido de manganeso (MnO_2) (ver Figura 3-4 y Figura 3-5). Se coloca la cazuela de acero inoxidable en la estufa de gas para facilitar que los componentes queden bien diluidos. Una vez alcanzada la temperatura de ebullición se procede a introducir las piezas en el baño sin retirar la fuente de calor.

Se sumergen las piezas durante 35 minutos prestando especial atención a que no estén en contacto entre ellas para evitar posibles defectos en el acabado causados por el roce entre ellas en el proceso de fosfatado (ver Figura 3-6).



Figura 3-6 Comprobación y agitado de piezas durante el fosfatado (elaboración propia)

Una vez pasados 35 minutos, en otra cazuela se coloca agua destilada y se calienta a 100 °C ². Una vez alcanzada la temperatura de ebullición, se extraen las piezas del baño de fosfatado y se mantienen



Figura 3-7 Piezas en agua en ebullición tras el fosfatado (elaboración propia)

² El grado en Celsius es una unidad de temperatura termodinámica, es la fracción 1/273.16 de la temperatura termodinámica del punto triple del agua. $T(^{\circ}C) = T(K) - 273,15$ [57].

en el cazo de agua hirviendo durante 10 minutos (ver Figura 3-7) con esto se eliminan los excesos de fosfatado y la superficie queda limpia.

Por último, es necesario curar el fosfatado. Para ello hay que mantener las piezas en aceite durante al menos 4 horas. En este caso en concreto, las piezas permanecieron un total de 5 días en aceite para exponer a los diferentes ambientes a todas las piezas simultáneamente.



Figura 3-8 Pieza fosfatada finalizada (elaboración propia)

3.1.3 Fosfatado de manganeso cataforizado

Como se ha explicado anteriormente, la cataforesis es ampliamente utilizada para aplicar pintura en una superficie metálica. Al conseguir mediante el fosfatado una superficie porosa que contribuye a la posibilidad de aplicar otro acabado que se adhiera a la superficie, resulta un método muy adecuado para someter a una posterior cataforesis.

Los componentes que se necesitan para este proceso son los reflejados en la Tabla 3-2.

Componentes	
Piezas fosfatadas	6
Pieza de acero sin tratar	1
Pintura para cataforesis	400 ml
Fuente de alimentación	
Horno	
Medios de protección personal (gafas y guantes)	

Tabla 3-3 Componentes para el fosfatado de manganeso con cataforesis (elaboración propia)

3.1.4 Desarrollo del proceso

En primer lugar, se vierten los 400 ml de pintura para cataforesis en un vaso medidor. En él, se introduce la placa fosfatada conectada al polo negativo de la fuente que va a actuar como ánodo y se introduce también la placa de acero conectada al polo positivo de la fuente y que actuará como cátodo (ver Figura 3-9).

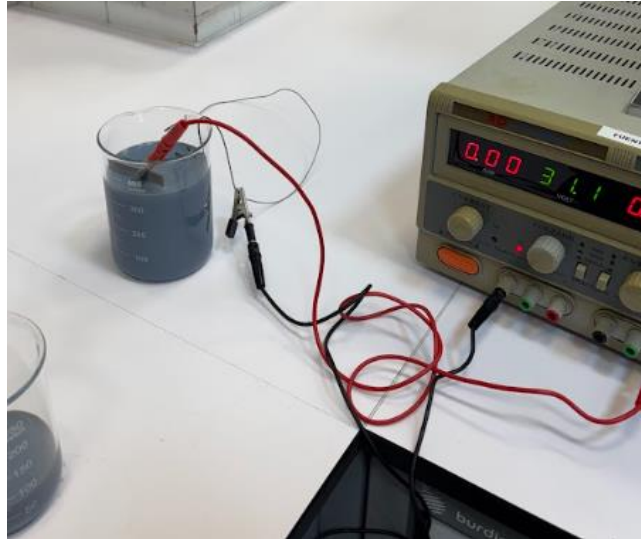


Figura 3-9 Montaje para cataforesis (elaboración propia)

Se le imprime un voltaje de 30 V^3 y un amperaje de $0,9\text{ A}^4$. Se trata durante 15 minutos y una vez transcurrido ese tiempo, se apaga la fuente e introducen las piezas en el horno a 180°C durante 20 minutos para que la pintura seque y el acabado quede curado.

Una vez terminadas se guardan en aceite hasta que vayan a ser expuestas a los ambientes a estudiar. El acabado presenta una superficie lisa de color azul oscuro y con cierto brillo con aspecto de esmaltado (ver Figura 3-10).



Figura 3-10 Pieza fosfatada con cataforesis finalizada (elaboración propia)

³ El voltio es una unidad de diferencia de potencial. Es igual a un julio por culombio, lo que implica que un voltio es la cantidad de energía que se necesita para mover una carga eléctrica de un culombio a través de un potencial de un julio [57].

⁴ El amperio es una unidad de corriente. Corresponde a aquella corriente continua que, cuando se mantiene en dos conductores rectos plano paralelos de longitud infinita y de sección circular despreciable, ubicados entre sí a una distancia de 1 metro en el vacío, produciría entre esos conductores una fuerza igual a 2×10^{-7} newton por metro de longitud [57].

3.2 Pavonado en frío con ácido comercial

Para este propósito, se utiliza el producto Ballistol® y se siguen una serie de pasos detallados a continuación. Este proceso resulta muy efectivo ofreciendo un acabado de buena apariencia sin necesidad de mucho material y siendo además una opción económica.

Componentes	
Piezas de acero	6
Pavonador “Ballistol ®”	
Lana de acero 000	
Alcohol isopropílico	
Pistola de calor	
Medios de protección personal (gafas y guantes)	

Tabla 3-4 Componentes para el pavonado en frío con ácido comercial (elaboración propia) (ver Figura 3-11)



Figura 3-11 Elementos necesarios para la realización del pavonado en frío con ácido comercial (elaboración propia)

3.2.1 Desarrollo del proceso

Para aplicar el líquido pavonador Ballistol® de manera uniforme, se debe empapar una brocha o pincel con el producto y distribuirlo cuidadosamente sobre las piezas, evitando el contacto con otras superficies. Tras haber cubierto toda la pieza, se procede a acelerar el secado utilizando una pistola de calor (ver Figura 3-11). Una vez que la pieza esté completamente seca, se eliminarán los restos de óxido en la superficie mediante lana de acero de forma suave y humedecida en alcohol isopropílico, con el fin de interrumpir la reacción del ácido con el acero.

Este proceso se debe repetir varias veces hasta conseguir que la pieza quede uniformemente tratada y con una adecuada capa protectora. En este caso, se le aplicaron 6 capas a cada una de las piezas de acero.

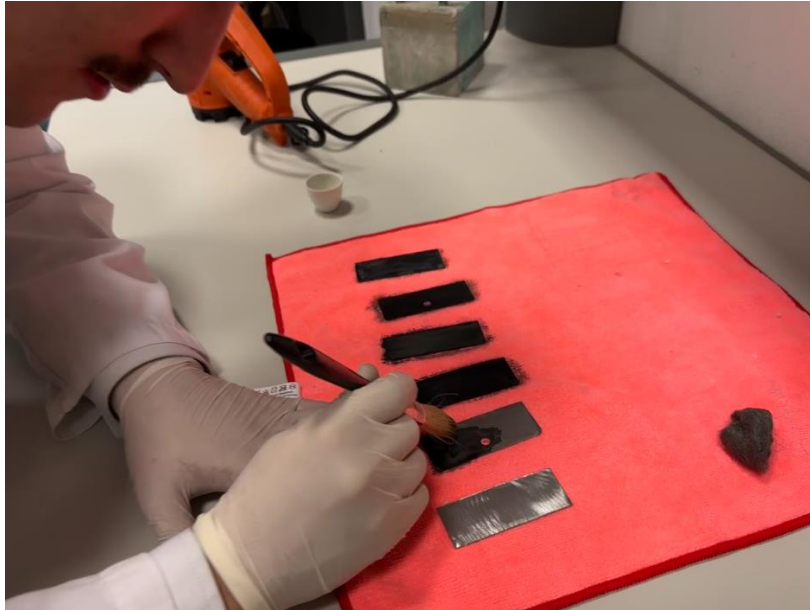


Figura 3-13 Aplicación primera capa de producto (elaboración propia)



Figura 3-12 Pieza final pavonado en frío con ácido comercial (elaboración propia)

3.3 Pavonado con aerosol *Tecnanblue*®

El producto empleado para este acabado es el aerosol Tecnanblue™. Este es un recubrimiento nanotecnológico diseñado para el pavonado en frío de aceros, proporcionando una capa uniforme de óxidos metálicos sin necesidad de altas temperaturas [58]. Destaca por su fácil aplicación, alta adherencia y resistencia a la corrosión. Su formulación permite un acabado estético negro intenso, mejorando las propiedades del material tratado. Además, reduce el impacto ambiental y el uso de productos químicos agresivos o aceites de difícil reciclado.

Componentes	
Piezas de acero	6
Pavonador “Tecnanblue™”	
Medios de protección personal (gafas, mascarilla y guantes)	

Tabla 3-5 Componentes para pavonado con aerosol Tecnanblue™ (elaboración propia)

3.3.1 Desarrollo del proceso

El proceso empleando este producto consiste en la aplicación de una capa rociando el producto a 20 cm de distancia entre el bote de aerosol y la pieza. Se rocía el producto hasta que visualmente se ha cubierto la superficie uniformemente y, posteriormente, se debe dejar secar un mínimo de 4 horas (ver Figura 3-14) hasta poder aplicar el producto en la cara posterior.



Figura 3-14 Secado de piezas tras la aplicación de una capa (elaboración propia)

Finalmente, para la curación completa de la pieza, se requieren, al menos, de 24 horas al aire libre para asegurar la correcta fijación y adhesión del acabado.

Se puede observar un acabado negro tizón con gran rugosidad y un tacto áspero (ver Figura 3-15). Se puede apreciar que este método añade una cantidad considerable de material a la superficie.



Figura 3-15 Pieza final pavonado con aerosol Tecnanblue™ (elaboración propia)

3.4 Cobreado electrolítico

El cobreado electrolítico deposita una capa de cobre sobre un sustrato metálico mediante electrólisis. Se utiliza para mejorar la conductividad eléctrica, la resistencia a la corrosión y la adherencia de capas posteriores en procesos de recubrimiento. Destaca por obtener acabados uniformes y controlar el espesor del recubrimiento según los requerimientos mediante la primera ley de Faraday. Además, puede emplearse como base para otros tratamientos. Para el tratamiento de Niquelado de este trabajo, se ha realizado previamente este tratamiento.

Componentes	
Piezas de acero	12
Electrodo de cobre puro (Cu)	1
Agua destilada	200 ml
Salfumant ® (23% HCl)	200 ml
Sosa Cáustica	5 mg
Acetona	
Algodón	
Fuente de alimentación	
Medios de protección personal (gafas y guantes)	

Tabla 3-6 Componentes necesarios para cobreado electrolítico (elaboración propia)

3.4.1 Desarrollo del proceso

En un vaso medidor, se vierten el agua destilada y el Salfumant ® a partes iguales. Esta mezcla cumple la función de electrolito y en ella se va a dar la reacción de oxidación reducción que consiste en la transferencia de electrones entre ánodo y cátodo.

Se sumerge una pieza de acero conectada al polo negativo y que actúa como ánodo, mientras que el electrodo de cobre puro se conecta al positivo (ver Figura 3-16) actuando así como cátodo. Éste último va a ser el que transfiera los electrones al ánodo formándose así un recubrimiento de cobre en su superficie. Para ello, se somete a una corriente eléctrica de 0,9 A y un voltaje de 8 V durante 25 minutos cada pieza.

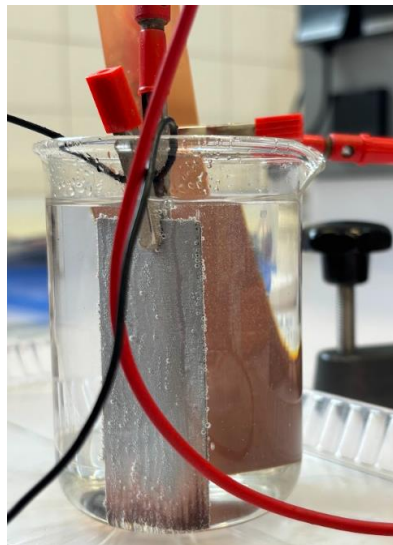


Figura 3-16 Primera pieza en el electrolito se aprecia el inicio del cobreado en la parte inferior de la pieza (elaboración propia)

Por otro lado, se prepara otro vaso medidor con 400 ml de agua destilada y 5 mg de sosa cáustica para conseguir un pH de 10,5. Una vez transcurridos los 25 minutos (ver Figura 3-17) y comprobando que el cobreado haya quedado homogéneo, se apaga la fuente de alimentación y se sumerge la pieza cobreada en esta solución para parar la reacción. Posteriormente se limpia la superficie con un algodón impregnado en acetona y se sumergen las piezas en aceite para evitar la exposición al medio antes del estudio (Ver figura 3-18).

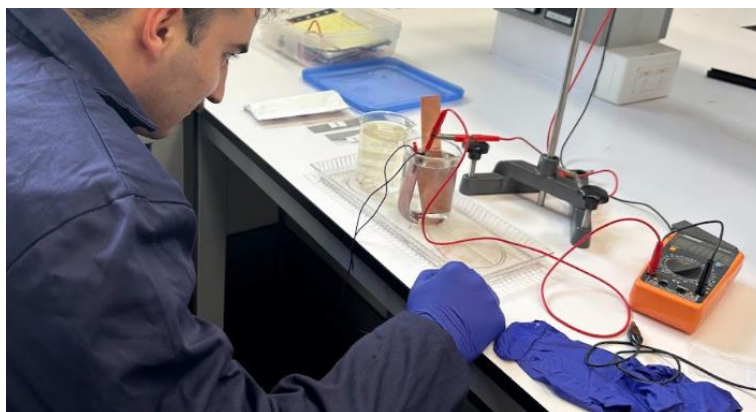


Figura 3-17 Seguimiento del cobreado (elaboración propia)

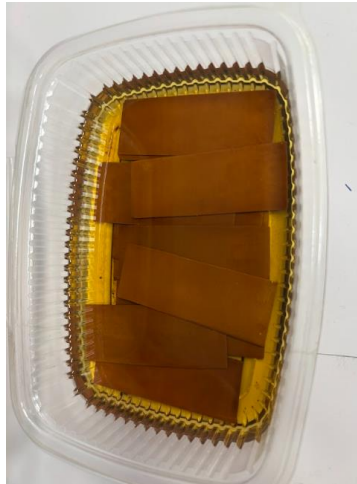


Figura 3-19 Piezas cobreadas en el baño de aceite (elaboración propia)



Figura 3-18 Pieza final cobreada (elaboración propia)

3.5 Niquelado electrolítico

El proceso de niquelado electrolítico consiste, al igual que el cobreado electrolítico, en la deposición de una capa de níquel sobre un sustrato metálico mediante electrólisis. Su aplicación permite mejorar la resistencia a la corrosión, aumentar la dureza superficial y proporcionar un acabado estético uniforme de coloración gris. En el presente trabajo, se ha realizado un pretratamiento previo de cobreado para optimizar la adherencia del níquel sobre la superficie metálica.

Componentes	
Piezas de acero cobreado	6
Electrodo de níquel puro (Ni)	2
Vinagre de alcohol	400 ml
Sal	10 g

Acetona

Algodón

Fuente de alimentación

Medios de protección personal (gafas y guantes)

Tabla 3-7 Componentes necesarios para niquelado electrolítico (elaboración propia)

3.5.1 Desarrollo del proceso

En primer lugar, para aumentar la efectividad de este método es necesario crear un electrolito de níquel. En un vaso medidor se vierten 400 ml de vinagre de alcohol (CH_3COOH al 6% en volumen y H_2O), 10g de sal y se colocan ambos electrodos de níquel. Uno de ellos se conecta al polo positivo de la fuente y el otro al negativo. Se configura una corriente de 0,7 A y un voltaje de 10 V y se mantiene encendida durante 2 horas. El electrolito estará preparado cuando adquiera una coloración verde azulado (ver Figura 3-19). Este color corresponde a las moléculas de Ni^{2+} disueltas en la solución y es lo que aumentará considerablemente la efectividad del método.



Figura 3-20 Electrolito de níquel formado de color verde azulado (elaboración propia)

Una vez formado el electrolito, se sumerge una pieza de acero cobreado por electrólisis del apartado anterior, conectada al polo negativo, que actuará como cátodo, mientras que una placa de níquel puro se conecta al polo positivo, funcionando como ánodo (ver Figura 3-20). Durante el proceso, los iones de níquel del electrodo y del electrolito se depositan sobre la superficie del cátodo, formando una capa uniforme de níquel. Para ello, se aplica una corriente eléctrica de 0,9 A y un voltaje de 8 V durante 35 minutos por pieza.

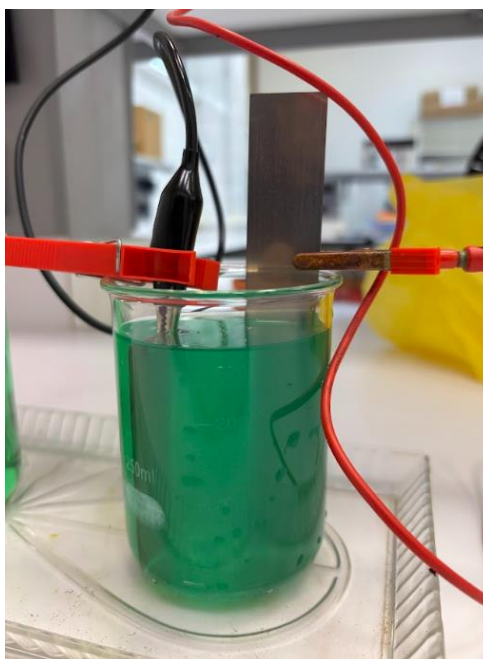


Figura 3-21 Montaje para el niquelado electrolítico con la pieza bronceada a niquelar en su interior (elaboración propia)

Tras completar el tiempo de deposición y verificar la uniformidad del recubrimiento, se apaga la fuente de alimentación y la pieza niquelada se limpia con un algodón impregnado en acetona y se sumerge en aceite protector, evitando la exposición al medio ambiente antes de su análisis.



Figura 3-22 Pieza cobreada (izquierda) y pieza tras el niquelado (derecha) (elaboración propia)



Figura 3-23 Pieza final niquelado electrolítico (elaboración propia)

3.6 Zincado en frío

El proceso de zincado en frío con aerosol consiste en depositar una fina capa de zinc sobre un sustrato metálico mediante la aplicación de un recubrimiento en aerosol. Su utilización mejora notablemente la resistencia a la corrosión, refuerza la durabilidad superficial y proporciona un acabado estético uniforme de tonalidad plateada sin brillo y que deja una superficie porosa y algo rugosa al tacto. Además, al tratarse de un proceso en frío, se evita la deformación del sustrato y se facilita una aplicación rápida y controlada, garantizando la integridad del material.

Componentes	
Piezas de acero	6
Zincado en frío con aerosol	
Medios de protección personal	

Tabla 3-8 Componentes necesarios para zincado en frío (elaboración propia)

3.6.1 Desarrollo del proceso

Este método es muy rápido y sencillo de realizar. Se colocan las piezas de acero sobre una superficie limpia y se rocía el producto a 15 cm de distancia de las piezas y mediante pequeñas y uniformes pulverizaciones (ver Figura 3-24). Es de especial importancia asegurarse de pulverizar en los bordes de las piezas para evitar que pueda aparecer corrosión en ellos.

Una vez aplicada la capa, se deja secar un mínimo de 12 horas para asegurar una curación y adherencia adecuadas. Una capa del producto es suficiente para este acabado aunque se le puede aplicar una segunda capa una vez haya terminado el tiempo de curación. En el contexto de este trabajo, se ha aplicado solamente una capa de zincado.



Figura 3-25 Aplicación de zincado en frío a las piezas de acero (elaboración propia)



Figura 3-24 Pieza final zincado en frío (elaboración propia)

3.7 Pintado con aerosol

El proceso de pintado con aerosol consiste en depositar una capa de pintura sobre un sustrato metálico mediante la aplicación de un recubrimiento en aerosol. Previo a la aplicación de la pintura, se utiliza una imprimación que favorece una adhesión óptima, asegurando que el acabado final sea homogéneo y duradero. Este tratamiento no solo mejora la resistencia a la corrosión, sino que también refuerza la integridad y apariencia estética del material, ofreciendo una amplia gama de colores que no se pueden obtener con otros acabados, una tonalidad consistente y un brillo controlado según las especificaciones del recubrimiento así como características especiales como por ejemplo la reducción de la firma infrarroja del material a tratar. Además, al tratarse de un proceso en frío, se evita la deformación del sustrato y se permite una aplicación rápida y uniforme, garantizando la calidad del resultado final siendo además una opción económica.

Componentes	
Piezas de acero	6
Imprimación MTN pro	
Pintura MTN 94 gris humo	
Esmalte MTN anticorrosivo transparente	
Medios de protección personal (gafas, mascarilla y guantes)	

Tabla 3-9 Componentes necesarios para pintado con aerosol (elaboración propia)

3.7.1 Desarrollo del proceso

Al igual que el zincado en frío, es un método sencillo aunque requiere más tiempo debido a que es necesario aplicar más capas y dejar que sequen completamente hasta aplicar la siguiente.

Inicialmente, se aplica una imprimación sobre las piezas de acero, previamente limpias, para asegurar una adecuada adhesión de la pintura final. Se aplican 2 capas de imprimación con aerosol a 20 cm de las piezas dejando 6 horas de secado entre las capas. Una vez preparada la superficie con la imprimación, se rocía la pintura a 15 cm de distancia, realizando pulverizaciones pequeñas y uniformes. Es especialmente importante cubrir los bordes de las piezas para evitar zonas sin protección que puedan favorecer la corrosión. Tras la aplicación de la pintura, se deja secar durante al menos 8 horas para garantizar una adherencia óptima. Y, una vez secada la primera capa, se le debe dar una segunda, mejorando así la apariencia del tratamiento.

Para finalizar el proceso y proteger la pintura, se le aplica una capa de esmalte que debe secar durante al menos 6 horas y que le ofrece a la pieza un aspecto más brillante.



Figura 3-26 Pieza final pintado con aerosol (elaboración propia)

3.8 Metodología de las pruebas de estrés

3.8.1 Localización de los diferentes ambientes de estudio

Para poder evaluar el comportamiento de los acabados superficiales detallados anteriormente, se realiza un estudio de diferentes entornos de estrés rigurosamente seleccionados para reproducir con la mayor fidelidad posible las condiciones operativas a las que están expuestas las unidades de la Armada y las herramientas empleadas en la industria y fuerzas armadas. La selección de estas áreas se basó en su similitud con ambientes marinos reales, caracterizados por una elevada salinidad que incrementa significativamente el proceso de corrosión en aceros utilizados en aplicaciones navales. Además, se consideraron parámetros críticos como la humedad relativa y la exposición prolongada a la intemperie, donde la lluvia o la exposición solar son factores que contribuyen a asemejar de manera precisa las condiciones climáticas extremas a las que pueden estar sometidas las piezas

Para garantizar una evaluación objetiva y representativa, las muestras fueron sometidas a estos entornos bajo condiciones controladas y que permiten acelerar los procesos de oxidación y analizar con mayor precisión la eficacia de cada tratamiento en la mitigación de la corrosión. Con ello, se consigue poder cuantificar la efectividad de los acabados superficiales con los que se han tratado las piezas.

El objetivo de las pruebas de estrés es someter a las piezas a la salinidad, humedad, acidez, luz solar, otros factores climatológicos y a gases derivados de la combustión de motores. Para ello se seleccionaron las localizaciones de la Tabla 3-10.

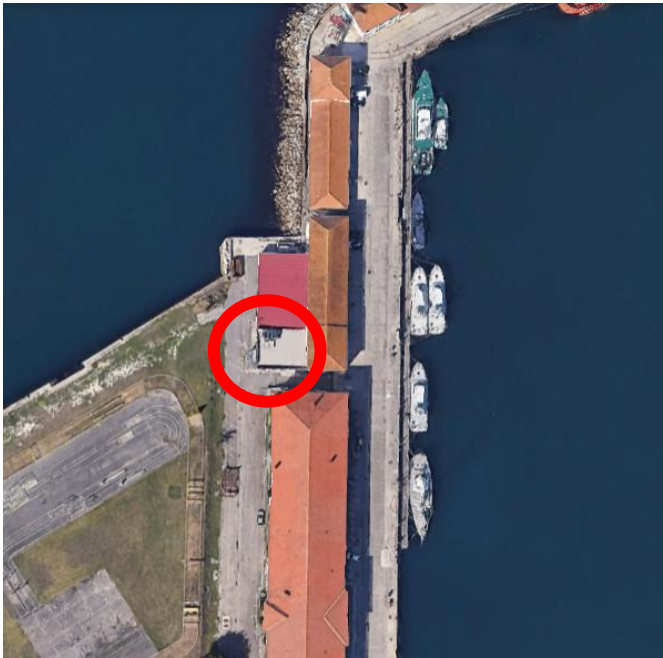
Localización de los diferentes ambientes de estudio		
Terraza del pañol de buceo		
1		Esta localización es idónea para la exposición de las piezas a un entorno húmedo salino y expuesto a la luz e intemperie. Estos factores contribuyen notablemente a la aparición de oxidación en un breve periodo de tiempo. Además, es un espacio que permite replicar con gran precisión la exposición de piezas e infraestructuras metálicas en zonas costeras de alta humedad y en presencia de un ambiente salino.
Lanchas de instrucción		

Figura 3-27 Imagen satélite de la parte norte del edificio Isaac Peral (tomada de [59])

2	 Figura 3-28 Imagen de las lanchas de instrucción de la Escuela Naval Militar (tomada de [60])	Se han colocado las piezas en la extracción de los motores dentro de la cámara de máquinas. Con esto se consigue simular un ambiente en el que se encuentren sometidas a la presencia de gases de combustión y replica a la perfección el ambiente de una cámara de máquinas de un buque tanto del ámbito civil como militar.
Edificio de investigación del CUD		
3	 Figura 3-29 Laboratorio de mecánica en el edificio de investigación del CUD (elaboración propia) 	En este laboratorio de mecánica, se han desarrollado dos medios sintéticos de exposición de piezas: 1. Cámara salina en ambiente ácido. 2. Cámara salina en ambiente básico. Las cámaras salinas se encuentran automatizadas aplicando dos vaporizaciones al día de 45 minutos. Con esto, se pretende someter a las piezas a un medio de salinidad controlada y calculada en el laboratorio (5%) y someter así mismo a las piezas a un estudio de la influencia que tiene el pH del medio con la mayor o menor corrosión que experimentan. Los pH de cada cámara son: pH 2 para la cámara salina ácida y pH 10,5 para la cámara salina básica. Este ambiente simula así mismo el impacto que

	Figura 3-30 Cámara salina con medidor de pH, humedad y temperatura (elaboración propia) 	puede tener la lluvia ácida en un ambiente costero y se contrastan los resultados con un medio de pH significativamente mayor para cuantificar la influencia del pH del medio salino con la corrosión que experimentan.
	Figura 3-31 Cámara salina con las piezas a estudiar siendo colocadas (elaboración propia)	
Muelle de cruceros		
4	 Figura 3-32 Imagen satélite del muelle de cruceros de la Escuela Naval Militar (tomada de [59])	En esta localización, las piezas se encuentran sumergidas en el agua de la Ría de Pontevedra, exponiéndose así directamente al agua salada. En este medio, la salinidad y temperatura del agua son variables y el objetivo es simular partes sumergidas de buques o estructuras submarinas que se encuentren en medios similares y totalmente sumergidas a baja profundidad y que por ello también se encuentran influenciadas por la presencia de luz solar, cambios considerables de temperatura y partículas presentes en el entorno marino.

Tabla 3-10 Localización de los ambientes de estudio y justificación de selección (elaboración propia)

3.8.2 Cálculo del pH de las cámaras salinas

Como se ha expuesto anteriormente, para la exposición de las piezas, se crean dos cámaras salinas en las que se imprime una determinada salinidad similar a la presente en el océano y además, para aumentar el estrés de las piezas y estudiar la influencia del pH en la corrosión del acero, se crea una cámara salina de pH ácido y otra de pH básico.

Los pH seleccionados son pH 2 y pH 10,5.

Para la preparación de la disolución salina de pH 2, es necesario calcular la concentración de $[H^+]$. En primer lugar, se disuelven 100 gramos de sal en 2 litros de agua destilada para obtener una concentración ligeramente superior a la concentración salina media del mar (35 gramos de sal por litro).

A continuación se realizan los cálculos para conseguir el pH 10,5 empleando sosa cáustica como base de la solución. Para este preparado, se emplean 2 litros de agua destilada y 100 gramos de sal.

Una vez las disoluciones de las cámaras salinas han alcanzado la acidez y basicidad adecuadas y realizar las pertinentes mediciones con instrumentos de medida de pH, se colocan las piezas separadas del líquido y se sumerge un nebulizador. Para evitar una humedad en el entorno salino demasiado alta, se regula el tiempo de pulverización a un total de 45 minutos separados en dos franjas horarias. Además, para tener regulado el pH de la cámara y la temperatura se emplea un medidor electrónico con el que llevar constancia de los cambios que existan en las condiciones de las cámaras salinas y corregir posibles agentes que afecten en la obtención de datos experimentales con validez.

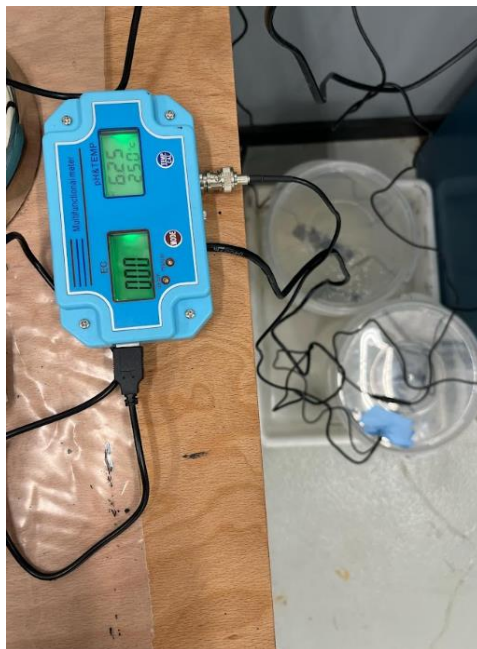


Figura 3-33 Montaje de las cámaras salinas con el medidor de pH y temperatura (elaboración propia)

4 RESULTADOS

A continuación, se realizará el análisis de los resultados y validación de las pruebas a las que han sido sometidas las piezas. Con esta sección se ofrecerá el estudio de la eficacia de los diferentes acabados superficiales con los que se ha tratado cada una de las piezas así como el impacto de los medios a los que se les ha expuesto para poder asignar diversos tratamientos a las piezas dependiendo del uso o ambiente en el que van a trabajar. Además, se examinarán los objetivos principales y secundarios del proyecto.

Para poder realizar lo citado anteriormente, se realiza la comparación de los acabados superficiales; fosfatado, fosfatado con cataforesis, pavonado en frío con ácido comercial, pavonado con pavón Tecnanblue™, cobreado electrolítico, niquelado electrolítico, zincado en frío y pintado con aerosol. De esta manera, se evaluarán sus propiedades e idoneidad en la prevención de la corrosión. Además, con el análisis de las piezas testigo, se evalúa también la adherencia y calidad de cada uno de los tratamientos a los que se ha sometido al acero.

Finalmente, las probetas se someten a la exposición en los ambientes preparados para causar un alto estrés corrosivo y poder comparar así el rendimiento de estos resultados entre ellos y concluir el grado de protección que ofrece cada método. Los controles a las piezas se realizan cada 2 días.

Todo este estudio contribuye a la obtención de información clave para determinar la eficiencia y las posibles limitaciones de cada tipo de acabado en la preservación del acero frente a la oxidación.

Para las piezas expuestas en el exterior, se ofrece a continuación un registro de la climatología presente durante las 3 semanas que se encontraron en el exterior.



Figura 4-1 Condiciones climatológicas durante las 3 semanas de exposición (tomada de [61])

A continuación, se ofrece toda esta información separada por ambientes de exposición.

4.1 Terraza del pañol de buceo

Gracias a su ubicación costera y el clima que recrea fielmente las condiciones marinas o en lugares de costa, este sitio resulta ideal para evaluar el comportamiento de las piezas expuestas a la intemperie y a los elementos. Al estar completamente expuesta, permite que el acero entre en contacto directo con factores esenciales en su proceso de oxidación, como la humedad, la salinidad del aire y las condiciones meteorológicas. Todas estas características hacen de este lugar un escenario óptimo para este tipo de pruebas y análisis de los métodos de protección ante la corrosión del acero.

Durante la exposición, los primeros días hubo presencia de nubes y claros (ver Figura 4-1). A los dos días de exposición exterior, el fosfatado y pavonado en frío con ácido comercial, comenzaban a presentar signos evidentes de oxidación.

Después de 10 días de exposición, el cobreado y el niquelado presentaban zonas de oxidación mientras que las piezas de fosfatado y pavonado en frío con ácido comercial ya se encontraban totalmente oxidadas.

A los 16 días de exposición, no se aprecian cambios en las piezas a excepción del zincado en frío que comienza a oxidarse por los bordes.

Finalmente, al transcurrir las 3 semanas de exposición no se aprecian más cambios en el estado de las piezas y se concluye que, los acabados que aparentemente no han experimentado corrosión son el pavonado Tecnanblue®, el pintado y el fosfatado con cataforesis. Además, desde el punto de vista estético, de esos, los que más destacan por mantener la misma apariencia son el pavonado Tecnanblue™ y el fosfatado con cataforesis.

4.1.1 Análisis a microscopio

Análisis a microscopio del fosfatado a la intemperie	
Pieza completa	Microscopio
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada.	

Tabla 4-1 Análisis a microscopio del fosfatado a la intemperie (elaboración propia)

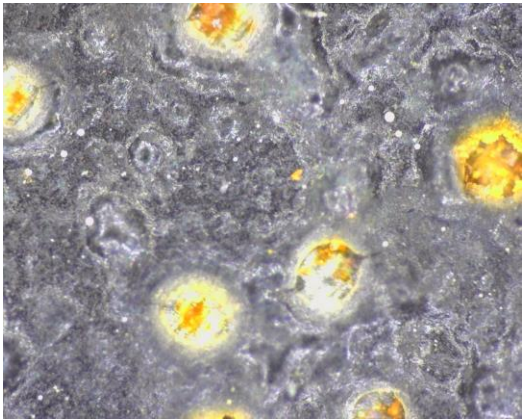
Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ a la intemperie	
Pieza completa	Microscopio
	
Estéticamente la pieza conserva su apariencia original. A microscopio se aprecian comienzos de oxidación en orificios de las nanopartículas.	

Tabla 4-2 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ a la intemperie (elaboración propia)

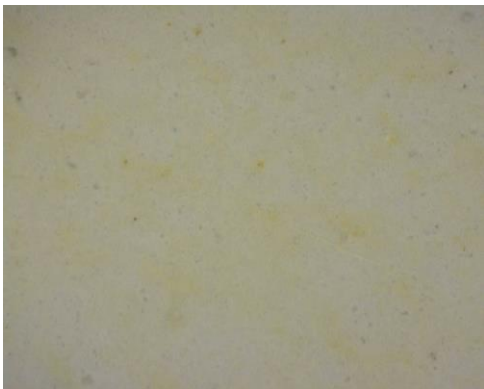
Análisis a microscopio del pintado a la intemperie	
Pieza completa	Microscopio
	
Se aprecia una ligera decoloración. El óxido está asentado en la capa superficial del pintado por lo que no ha sufrido corrosión en este medio.	

Tabla 4-3 Análisis a microscopio del pintado a la intemperie (elaboración propia)

Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis a la intemperie	
Pieza completa	Microscopio

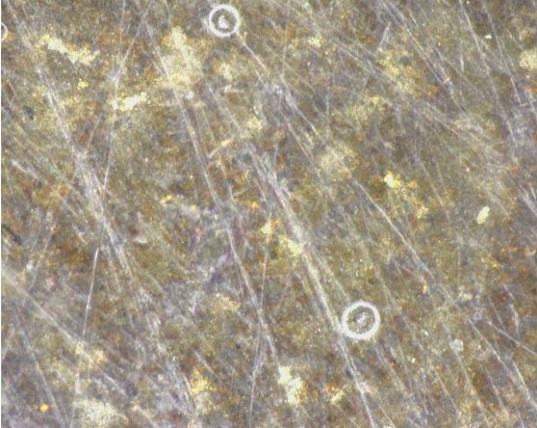
	
Aparentemente no se aprecia corrosión en la capa superficial del acabado. A microscopio se observa que existe un defecto en la cataforesis ya que esta se ha asentado sobre la capa de fosfatado con presencia previa de óxido.	

Tabla 4-4 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis a la intemperie (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial a la intemperie	
Pieza completa	Microscopio
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada.	

Tabla 4-5 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial a la intemperie (elaboración propia)

Análisis a microscopio del cobreado electrolítico a la intemperie	
Pieza completa	Microscopio

	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada.	

Tabla 4-6 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico a la intemperie (elaboración propia)

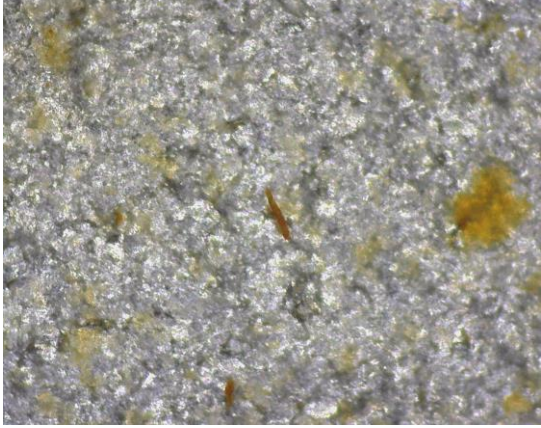
Análisis a microscopio del zincado en frío a la intemperie	
Pieza completa	Microscopio
	
Se aprecian zonas de corrosión a simple vista. A microscopio se confirma el inicio de puntos de corrosión en este medio.	

Tabla 4-7 Análisis a microscopio del zincado en frío a la intemperie (elaboración propia)

Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en a la intemperie	
Pieza completa	Microscopio

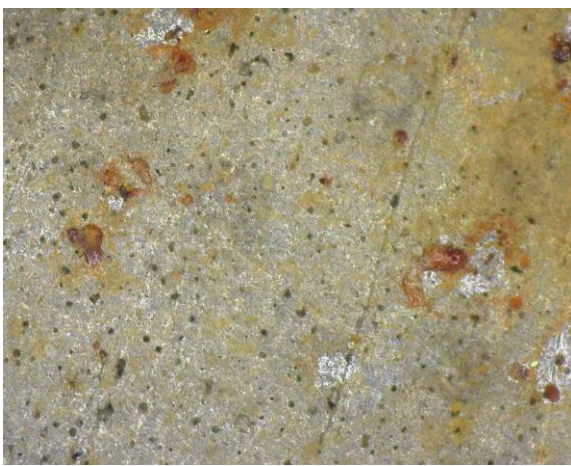
	
Se aprecia corrosión a simple vista en ciertas zonas de la pieza. A microscopio se observan puntos de corrosión en la capa de níquel.	

Tabla 4-8 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en a la intemperie (elaboración propia)

4.2 Lanchas de instrucción

El interior de la cámara de máquinas de las lanchas de instrucción es un entorno especialmente adecuado para el ensayo, ya que presenta características similares a las de la sala de máquinas de un buque de guerra y otros compartimentos cerrados a bordo. Al ser un espacio cerrado, permite establecer un ambiente controlado que facilita una evaluación precisa de la resistencia de los recubrimientos a la corrosión en diferentes condiciones de exposición.

Asimismo, la presencia de un ambiente con alta concentración de humedad y salinidad simula fielmente las condiciones operativas habituales en el ámbito naval. Este factor es clave para analizar el comportamiento real de los recubrimientos y su capacidad de protección frente a la degradación causada por la exposición constante a un entorno marino agresivo.

Las piezas se colocan el día 3 de marzo, antes de comenzar la semana de instrucción y adiestramiento.

Después de 10 días de exposición, no se aprecian cambios significativos en las piezas.

Finalmente, al transcurrir las 3 semanas de exposición solo el pavonado en frío con ácido comercial presenta una ligera decoloración y se concluye que, los acabados que aparentemente no han sufrido corrosión en la cámara de máquinas.

4.2.1 Análisis a microscopio

Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara de máquinas	
Pieza completa	Microscopio

	
A simple vista la corrosión es despreciable. A microscopio se observan inicios de corrosión.	

Tabla 4-9 Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara de máquinas (elaboración propia)

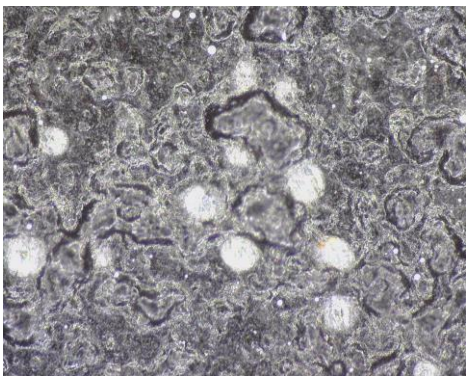
Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en la cámara de máquinas	
Pieza completa	Microscopio
	
A simple vista no se aprecia ningún signo de corrosión. A microscopio no existe corrosión pero sí que se observa un acabado rugoso.	

Tabla 4-10 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en la cámara de máquinas (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pintado en la cámara de máquinas	
Pieza completa	Microscopio
	

No se aprecia ningún signo de oxidación. Este método protege totalmente la pieza.

Tabla 4-11 Análisis a microscopio del pintado en la cámara de máquinas (elaboración propia)

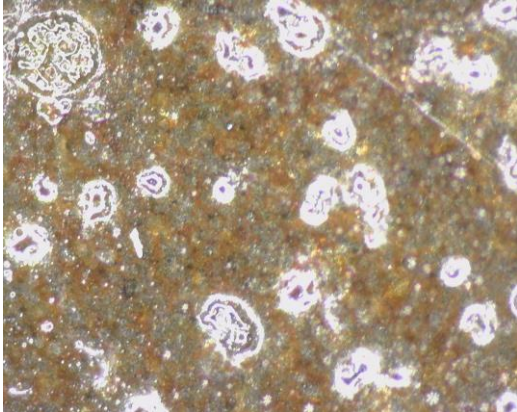
Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara de máquinas	
Pieza completa	Microscopio
	
En apariencia no existe corrosión. A microscopio se observa que existe un defecto en la cataforesis ya que esta se ha asentado sobre la capa de fosfatado con presencia previa de óxido.	

Tabla 4-12 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara de máquinas (elaboración propia)

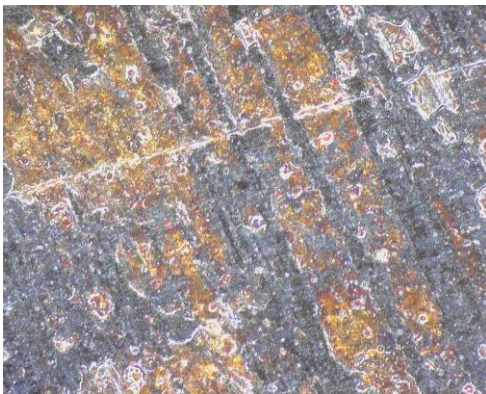
Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara de máquinas	
Pieza completa	Microscopio
	
En apariencia no existen signos de corrosión. A microscopio existen inicios de corrosión en la pieza.	

Tabla 4-13 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara de máquinas (elaboración propia)

Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara de máquinas	
Pieza completa	Microscopio

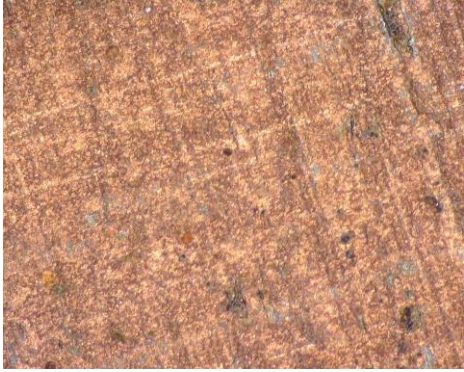
	
En apariencia no existen indicios de corrosión. A microscopio no existe corrosión por lo que el método protege de la corrosión.	

Tabla 4-14 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara de máquinas (elaboración propia)

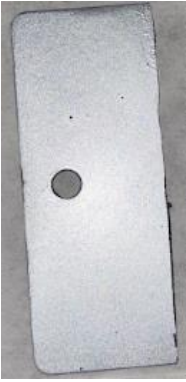
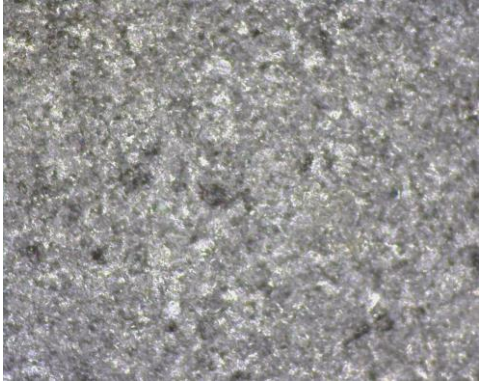
Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara de máquinas	
Pieza completa	Microscopio
	
En apariencia no existen indicios de corrosión. A microscopio no existe corrosión por lo que el método protege de la corrosión.	

Tabla 4-15 Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara de máquinas (elaboración propia)

Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara de máquinas	
Pieza completa	Microscopio
	

En apariencia no existen indicios de corrosión. A microscopio no existe corrosión, se observan porosidades en el acabado pero el método protege de la corrosión.

Tabla 4-16 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara de máquinas (elaboración propia)

4.3 Edificio de investigación del CUD

La cámara salina de pH básico y de pH ácido, son entornos idóneos para evaluar la eficacia de los recubrimientos contra la corrosión, ya que reproduce de manera acelerada las condiciones agresivas a las que los materiales pueden estar expuestos en entornos reales. Al mantener un ambiente controlado con alta concentración de humedad, salinidad y un pH extremo, permiten analizar de forma precisa el comportamiento de los recubrimientos frente a la degradación química.

Gracias a estas condiciones reproducibles y constantes, se pueden comparar distintos tratamientos y seleccionar aquellos que ofrecen una mayor protección y durabilidad en contextos exigentes.

Para las piezas en la cámara salina de condiciones básicas, estas son las observaciones que se realizan:

A los dos días de exposición, se aprecia oxidación en el fosfatado, pavonado en frío y cobreado mientras que el resto permanecen aparentemente inalterables.

Después de 6 días de exposición, las piezas de fosfatado y pavonado en frío con ácido comercial y cobreado ya se encontraban totalmente oxidadas y comienzan a apreciarse signos de oxidación en el niquelado y el cobreado presenta gotas de óxido por toda la pieza.

A los 12 días de exposición, las piezas con pavonado en frío con ácido comercial y fosfatado, experimentan un gran ataque a su superficie eliminando los rastros del acabado superficial debido a la corrosión. Además, el zincado en frío comienza a oxidarse por los bordes y el fosfatado con cataforesis y pavonado Tecnanblue™ presentan ligeras marcas de oxidación.

Finalmente, al transcurrir las 3 semanas de exposición se aprecia en uno de los bordes de la pieza pintada inicios de oxidación.

Por otro lado, para la cámara con condiciones ácidas, las observaciones son las siguientes:

A los dos días de exposición, se aprecia también oxidación en el fosfatado, pavonado en frío y cobreado mientras que el resto permanecen aparentemente inalterables

Después de 6 días de exposición, el niquelado presentaba gotas de oxidación en toda la pieza mientras que las piezas de fosfatado y pavonado en frío con ácido comercial y cobreado ya se encontraban totalmente oxidadas.

A los 14 días de exposición, las piezas con pavonado en frío con ácido comercial fosfatado y cobreado, experimentan un gran ataque a su superficie eliminando casi por completo los rastros del acabado superficial debido a la corrosión. Además, el zincado en frío comienza a oxidarse por los bordes y el fosfatado con cataforesis y pavonado Tecnanblue™ presentan ligeras marcas de oxidación.

Finalmente, al transcurrir las 3 semanas de exposición se aprecia en uno de los bordes de la pieza pintada inicios de oxidación y se concluye que, el pavonado Tecnanblue™, el pintado y el fosfatado con cataforesis, son los acabados que mejor ha resistido la corrosión en estos medios de ambiente salino con pH ácido y básico.

4.3.1 Análisis a microscopio cámara salina básica

Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara salina básica

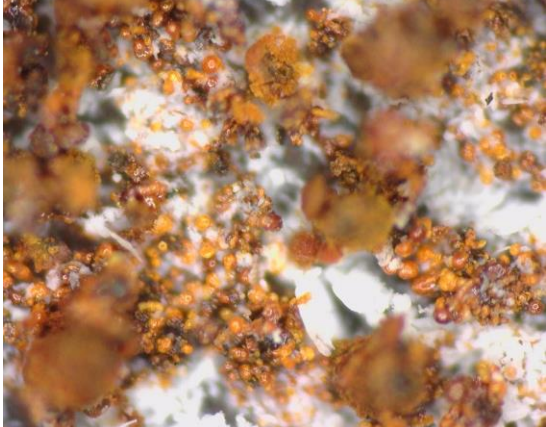
Pieza completa	Microscopio
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada y el acabado completamente eliminado.	

Tabla 4-17 Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara salina básica (elaboración propia)

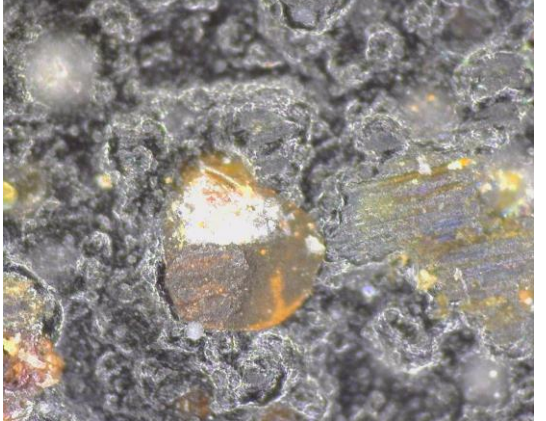
Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en la cámara salina básica	
Pieza completa	Microscopio
	
Estéticamente la pieza conserva su apariencia original. A microscopio se aprecian comienzos de oxidación en orificios de las nanopartículas.	

Tabla 4-18 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en la cámara salina básica (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pintado en la cámara salina básica	
Pieza completa	Microscopio

	
Aparentemente existe corrosión en los bordes de la pieza. A microscopio se observan inicios de corrosión superficial y zonas en las que comienzan a existir grietas causadas por la basicidad del medio.	

Tabla 4-19 Análisis a microscopio del pintado en la cámara salina básica (elaboración propia)

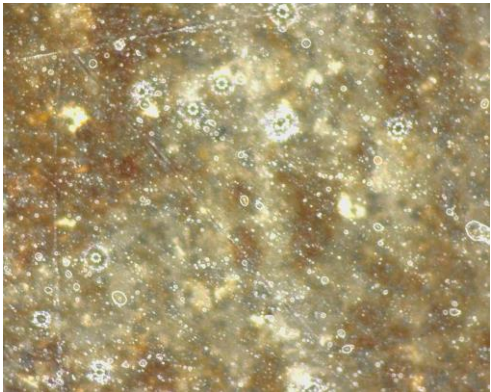
Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara salina básica	
Pieza completa	Microscopio
	
En apariencia existen pequeñas zonas con corrosión. A microscopio se observa que existe un defecto en la cataforesis ya que esta se ha asentado sobre la capa de fosfatado con presencia previa de óxido.	

Tabla 4-20 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara salina básica (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara salina básica	
Pieza completa	Microscopio

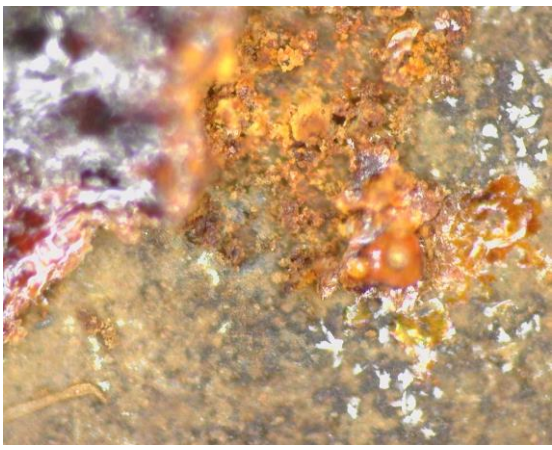
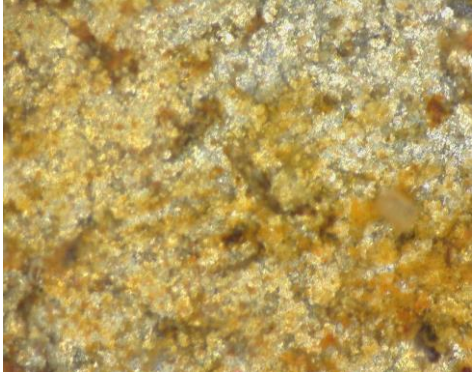
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada y el acabado casi en su totalidad desaparecido.	

Tabla 4-21 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara salina básica (elaboración propia)

Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara salina básica	
Pieza completa	Microscopio
	
Se aprecia corrosión a simple vista en la mayor parte de la pieza. A microscopio se observan puntos de corrosión en la capa de cobre y ciertos orificios por la basicidad del medio.	

Tabla 4-22 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara salina básica (elaboración propia)

Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara salina básica	
Pieza completa	Microscopio
	

Aparentemente la pieza presenta zonas con oxidación. A microscopio la pieza se encuentra en su mayoría con oxidación superficial.

Tabla 4-23 Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara salina básica (elaboración propia)

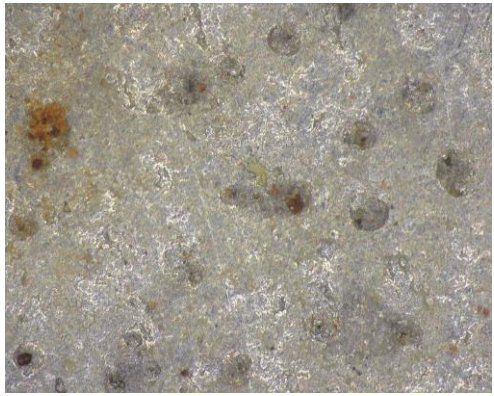
Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara salina básica	
Pieza completa	Microscopio
	
Aparentemente la pieza presenta zonas con oxidación. A microscopio la pieza presenta puntos de inicio de con superficial.	

Tabla 4-24 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara salina básica (elaboración propia)

4.3.2 Análisis a microscopio cámara salina ácida

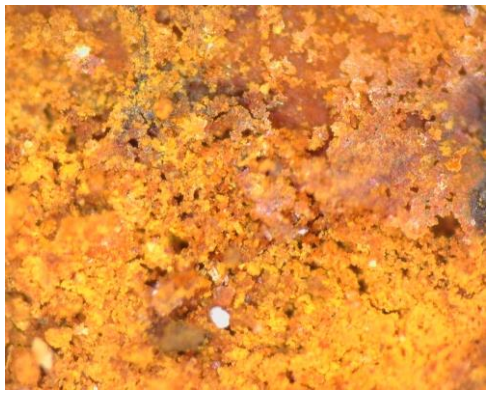
Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara salina ácida	
Pieza completa	Microscopio
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada.	

Tabla 4-25 Análisis a microscopio del fosfatado en la cámara salina ácida (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en la cámara salina ácida	
Pieza completa	Microscopio

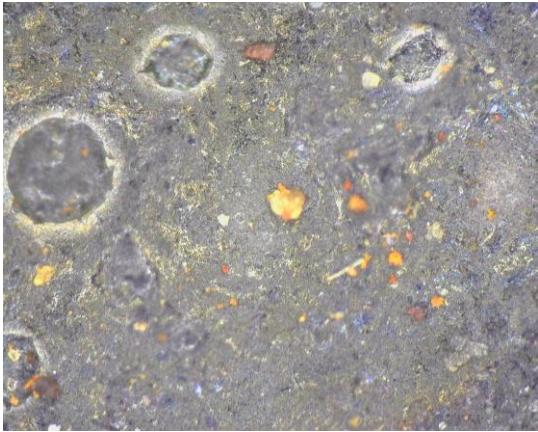
	
Aparentemente la pieza presenta puntos con corrosión. A microscopio la pieza presenta puntos de inicio de con superficial y orificios causados por la acidez del medio.	

Tabla 4-26 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en la cámara salina ácida (elaboración propia)

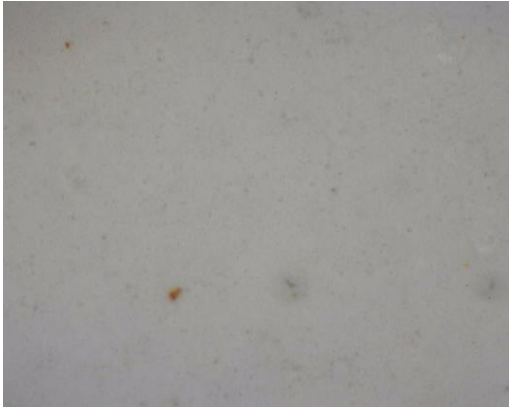
Análisis a microscopio del pintado en la cámara salina ácida	
Pieza completa	Microscopio
	
Aparentemente la pieza no experimenta corrosión. A microscopio la pieza presenta pequeños puntos de inicio de con superficial.	

Tabla 4-27 Análisis a microscopio del pintado en la cámara salina ácida (elaboración propia)

Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara salina ácida	
Pieza completa	Microscopio
	

Aparentemente la pieza presenta puntos con corrosión. A microscopio la pieza presenta puntos de inicio de oxidación superficial y orificios causados por la acidez del medio.

Tabla 4-28 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en la cámara salina ácida (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara salina ácida	
Pieza completa	Microscopio
	
En este medio la pieza se encuentra casi en su totalidad oxidada.	

Tabla 4-29 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en la cámara salina ácida (elaboración propia)

Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara salina ácida	
Pieza completa	Microscopio
	
Aparentemente la pieza presenta puntos con corrosión. A microscopio la pieza presenta puntos de inicio de oxidación superficial y orificios causados por la acidez del medio.	

Tabla 4-30 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en la cámara salina ácida (elaboración propia)

Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara salina ácida	
Pieza completa	Microscopio

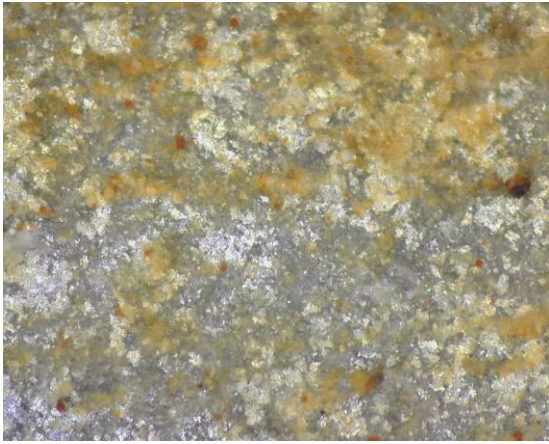
	
Aparentemente la pieza presenta puntos con corrosión. A microscopio la pieza presenta puntos de inicio de oxidación superficial y orificios causados por la acidez del medio.	

Tabla 4-31 Análisis a microscopio del zincado en frío en la cámara salina ácida (elaboración propia)

Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara salina ácida	
Pieza completa	Microscopio
	
Aparentemente la pieza presenta puntos con corrosión. A microscopio la pieza presenta puntos de inicio de oxidación superficial.	

Tabla 4-32 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en la cámara salina ácida (elaboración propia)

4.4 Muelle de cruceros

La inmersión en el mar es un método eficaz para evaluar la resistencia de los recubrimientos ante la corrosión en condiciones reales, considerando factores como salinidad, temperatura y microorganismos.

Permite analizar su durabilidad, adherencia y desgaste mecánico por rozamiento entre las piezas y con otros agentes externos en los entornos navales y marinos.

Además, facilita el estudio de la corrosión galvánica, proporcionando datos clave para seleccionar recubrimientos más eficientes y optimizar su mantenimiento.

A los 6 días de inmersión, todas las piezas presentaban en sus bordes oxidación debido al desgaste mecánico.

Transcurridos 10 días, la oxidación era completa en el fosfatado, pavonado con ácido comercial, cobreado y niquelado. Además, el pintado, zincado en frío y fosfatado con cataforesis, presentaban zonas

con corrosión debido al desgaste mecánico que había creado zonas en las que el acabado se estaba eliminando por fricción facilitando así la aparición de corrosión.

A los 12 días, se rompe la red que contenía las piezas no recuperándose la pieza fosfatada con cataforesis por lo que se pierde el análisis de esta pieza en inmersión. El resto permanece con condiciones similares a las observadas a los 10 días.

Finalmente, al término de las 3 semanas, resulta difícil reconocer los acabados debido a que la superficie de las piezas se encuentra altamente oxidada y presentando ligeros toques azulados en todas las piezas y, aquellas cuyo acabado presentaba mayor porosidad, esta había desaparecido y la superficie se encontraba completamente lisa.

4.4.1 Análisis a microscopio

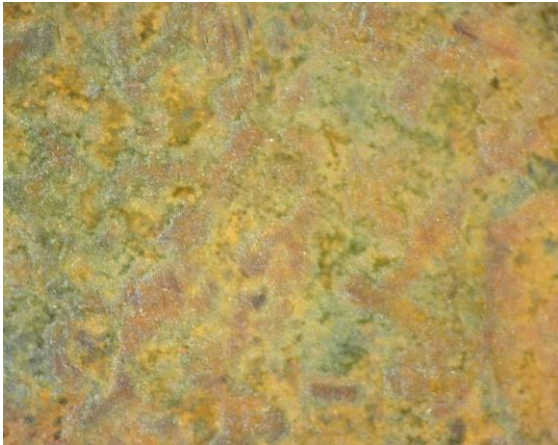
Análisis a microscopio del fosfatado en inmersión	
Pieza completa	Microscopio
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada.	

Tabla 4-33 Análisis a microscopio del fosfatado en inmersión (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en inmersión	
Pieza completa	Microscopio
	

En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada.

Tabla 4-34 Análisis a microscopio del pavonado Tecnanblue™ en inmersión (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pintado en inmersión	
Pieza completa	Microscopio
	
La pieza se encuentra parcialmente oxidada. A microscopio presenta oxidación en su capa exterior sin que esta penetre en el metal.	

Tabla 4-35 Análisis a microscopio del pintado en inmersión (elaboración propia)

Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en inmersión	
Pieza completa	Microscopio
	
La pieza se perdió en el mar.	

Tabla 4-36 Análisis a microscopio del fosfatado con cataforesis en inmersión (elaboración propia)

Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en inmersión	
Pieza completa	Microscopio

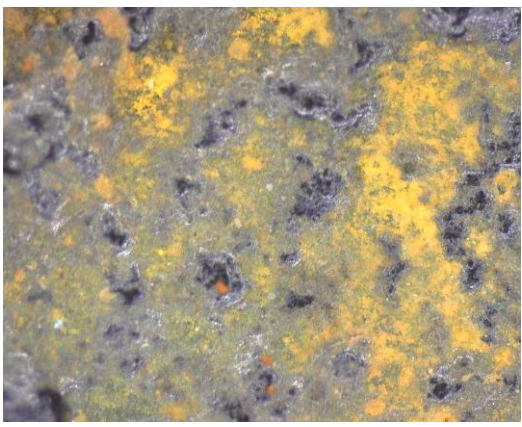
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada y presenta penetración en el metal en ciertos puntos.	

Tabla 4-37 Análisis a microscopio del pavonado en frío con ácido comercial en inmersión (elaboración propia)

Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en inmersión	
Pieza completa	Microscopio
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada.	

Tabla 4-38 Análisis a microscopio del cobreado electrolítico en inmersión (elaboración propia)

Análisis a microscopio del zincado en frío en inmersión	
Pieza completa	Microscopio

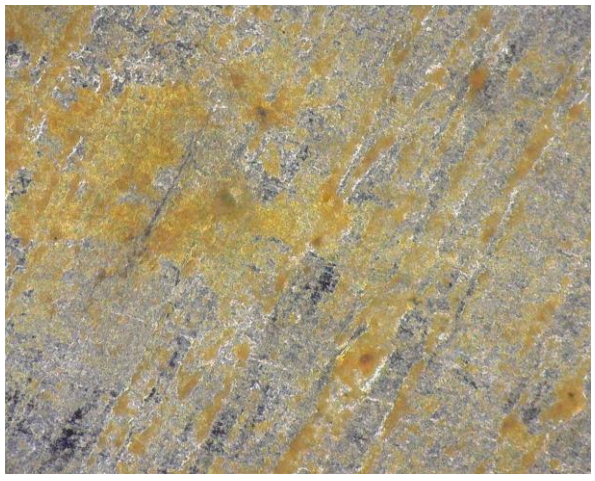
	
En este medio la pieza se encuentra oxidada. A microscopio se observa una oxidación que no es total.	

Tabla 4-39 Análisis a microscopio del zincado en frío en inmersión (elaboración propia)

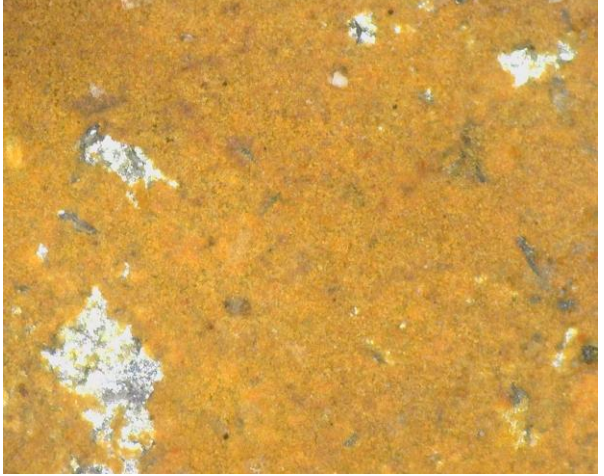
Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en inmersión	
Pieza completa	Microscopio
	
En este medio la pieza se encuentra completamente oxidada.	

Tabla 4-40 Análisis a microscopio del niquelado electrolítico en inmersión (elaboración propia)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones del trabajo

Una vez finalizado el estudio exhaustivo de los diferentes tratamientos de acabados superficiales, se ha logrado cumplir el objetivo principal del proyecto que era la evaluación y estudio comparativo de los acabados superficiales en acero como método de protección ante la corrosión. Con todo esto, se han expuesto los procesos a llevar a cabo y visibilizado los resultados ofreciendo con estos ensayos una demostración de la resistencia en entornos marítimos y pudiendo ser aplicada para la elección de acabados dependiendo de la exposición que vaya a sufrir durante su vida útil.

La metodología que se ha empleado durante este análisis ha sido la siguiente: análisis de los métodos más empleados en el ámbito de la protección contra la corrosión del acero, selección de los más empleados teniendo en cuenta sencillez, calidad de acabado y diversidad estética y cromática y, para finalizar, la evaluación de la calidad de cada uno de los acabados una vez finalizados y tras ser expuestos a los medios como forma de evaluación de su calidad.

Para la realización del análisis cuantitativo, se propone el siguiente método de calificación siendo 3 la máxima puntuación y 0 la menor (ver Tabla 5-1). Cada uno de los aspectos a valorar contará con dos mejores calificaciones, dos intermedias altas, dos intermedias bajas y dos peores calificados en comparativa con el resto de las piezas.

3	Mejor calificación
2	
1	
0	Peor calificación

Tabla 5-1 Sistema de calificación de las propiedades de los acabados superficiales (elaboración propia)

	Ensayo resistencia a la corrosión									
	Facilidad proceso	Acabado	Coste	Tiempo	Cámara máquinas	Intemperie	Cámara salina ácida	Cámara salina básica	Inmersión	Σ
Fosfatado	1	0	2	0	0	0	0	0	0	3
Pavonado Tecnanblue™	3	3	0	3	3	3	3	3	2	23
Pintado	1	3	1	1	3	3	3	2	3	20
Fosfatado con cataforesis	0	0	0	1	1	2	2	3	-	9
Pavonado en frío	2	1	1	2	0	0	0	0	0	7
Cobreado	2	1	3	2	2	1	1	1	1	13
Zincado	3	2	3	3	2	2	2	2	2	21
Niquelado	0	2	2	0	1	1	1	1	1	9

Tabla 5-2 Tabla análisis de la viabilidad y resistencia de los acabados (elaboración propia)

De los campos expuestos en la tabla (ver Tabla 5-2), a continuación se explican los motivos de selección de los mejores métodos en cada ámbito.

1. Facilidad del proceso: se selecciona el pavonado Tecnanblue™ y el zincado en frío. Ambos resultan muy sencillos de realizar ya que se requiere de un aerosol y una sola capa de producto que requiere de entre 4 y 6 horas de secado.
2. Estética del acabado: se seleccionan como mejores métodos el pavonado Tecnanblue™ que ofrece un color negro tizón homogéneo y sin brillos y el pintado ya que posibilita la aplicación de una amplia gama cromática y de texturas.
3. Según su coste, los métodos más económicos son el cobreado y el zincado en frío. El primero de ellos como material necesario es una pieza de cobre y formar un electrolito que puede ser realizado con vinagre y sal al igual que el niquelado o con ácido clorhídrico y el empleo de corriente eléctrica durante 25 minutos. Por otro lado el zincado en frío resulta muy económico ya que solo requiere de un aerosol que es fácil de obtener y por un precio muy competitivo.
4. Tiempo empleado: Destacan este campo el pavonado Tecnanblue™ y el zincado en frío. Ambos se realizan simplemente aplicando un aerosol sobre las piezas.
5. Resistencia a la corrosión: en líneas generales, los dos acabados que mejor han resistido la exposición a los medios pavonado Tecnanblue™ y el pintado. Tanto aparentemente como a microscopio, ambos productos han impedido casi en su totalidad el paso del óxido a la pieza incluso en los medios más demandantes.

Teniendo todo lo anterior en cuenta, se concluye que el acabado que mejores resultados ha dado y que mejores cualidades presenta es el pavonado Tecnanblue™, que aunque desde el punto de vista del coste no es muy ventajoso, para piezas de tamaño medio y que no requieran de una precisión de tolerancias muy alta, es un acabado que ofrece muy buenos resultados. Seguidamente, destacan el zincado cuyo acabado ha demostrado ofrecer buena protección contra la corrosión y cuya facilidad de proceso lo hacen muy destacable y el pintado que desde el punto de vista de la corrosión y tolerancia cromática es idóneo para aplicaciones de piezas de mayor tamaño que no experimenten gran fricción mecánica.

5.2 Líneas futuras

5.2.1 Aspectos a mejorar

Durante el proceso, se observan una serie de parámetros cuya mejora contribuiría al optimizar el proceso para realizarlo de forma más precisa y eficiente.

El primero de ellos es la limpieza exhaustiva de la placa de sacrificio de la cataforesis ya que se observa en ese acabado la deposición de una pequeña capa de óxido en su superficie concluyendo que este acabado, a pesar de su resistencia, amplifica los defectos superficiales previamente a la deposición de la capa de pintura.

Para todos los tratamientos con aerosol, se recomienda colocar las piezas a tratar en una superficie resistente véase una lámina de plástico, madera o metal para evitar que la pintura o tratamiento empleado, se adhiera a la superficie sobre la que se encuentran las piezas y eso derive en defectos superficiales que es necesario lijar para obtener un buen acabado.

Dentro del proceso de análisis de las piezas, sería de gran utilidad realizar una marcación por estampado de las piezas en algún lugar de su superficie par que resulte más sencillo identificar el acabado que tiene cada una de ellas una vez avanza la corrosión ya que, en alguna de ellas, la oxidación es total y deja de apreciarse bien el tipo de tratamiento que tiene. De esta manera, una persona ajena al experimento podría diferenciarlas por el estampado.

Para finalizar, en el análisis de la corrosión, se intentó usar el software ImageJ para poder cuantificar la cantidad de corrosión de cada una de las piezas pero el análisis no fue satisfactorio al encontrar problemas en la diferenciación del óxido y diferentes acabados, por lo que se propone el uso de Python para procesar esas imágenes y obtener numéricamente datos precisos del estado de las piezas una vez expuestas a los medios.

5.2.2 Futuras investigaciones

Como posibles estudios derivados, se proponen los siguientes enfoques:

1. Investigación de recubrimientos híbridos: en lugar de analizar tratamientos individuales, se puede explorar la combinación de diferentes técnicas como la realizada con el fosfatado y cataforesis para mejorar la resistencia a la corrosión. Por ejemplo, combinar otros métodos empleados como el niquelado con una posterior aplicación de cataforesis o estudiar el efecto de una doble capa de zincado con pavonado para evaluar sus nuevas características en ambientes marinos extremos.
2. Optimización del tratamiento de acero inoxidable en aplicaciones militares: aunque el acero inoxidable es naturalmente resistente a la corrosión, mejorar su rendimiento mediante técnicas como la nitruración o la deposición de películas cerámicas podría ser fundamental para la fabricación de componentes expuestos a condiciones severas, como sistemas de armas y estructuras navales o elementos que se encuentren sometidos a altos esfuerzos mecánicos.
3. Aplicación en vehículos blindados y equipamiento militar: investigar la efectividad de estos recubrimientos en la protección de vehículos militares, cascos de guerra y otros equipos esenciales. Se podría evaluar el impacto de la corrosión en blindajes de acero y aleaciones avanzadas, probando tratamientos que maximicen su vida útil sin comprometer sus propiedades mecánicas.
4. Técnicas avanzadas de restauración de equipos militares: además del pavonado, otros métodos como la electrodeposición o el uso de polímeros avanzados podrían ser evaluados para la recuperación de piezas oxidadas en armas, vehículos y estructuras navales. Esto permitiría reducir costos de mantenimiento y mejorar la sostenibilidad en la reutilización de equipos.

5. Estudio nuevos tratamientos con nanopartículas: realización de un estudio exhaustivo de la nueva aplicación de nanopartículas a este campo analizando la viabilidad de los métodos en aplicaciones que requieran de precisión dimensional.

En el ámbito naval, estos estudios pueden servir como referencia para futuras investigaciones enfocadas en mejorar la resistencia a la corrosión de materiales utilizados en la Armada. La aplicación de estos tratamientos en buques, submarinos y sistemas de defensa permitiría incrementar la longevidad de los equipos, reducir costos operativos y optimizar el desempeño en misiones prolongadas en entornos agresivos, como mares con alta salinidad.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Las cifras del acero en 2024 – Ategi». Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ategi.com/2024/06/12/las-cifras-del-acero-en-2024/>
- [2] «World Steel in Figures 2024», worldsteel.org. Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures-2024/>
- [3] UNE-EN 10020:2001. 2001.
- [4] R. Winston Revie y hervert H. Uhlig, Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering, Fourth Edition. Wiley-Interscience.
- [5] «Mecanismos de corrosión » Mecanicos Valencia». Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://mecanicosvalencia.es/mecanismo-de-corrosion/>
- [6] C. Industria, «La corrosión en la Industria», Conecta Industria. Accedido: 25 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.conectaindustria.es/articulo/industria/la-corrosion-en-la-industria/20191203104435006124.html>
- [7] S. R. U. Madriñán, «APLICACIÓN DE LA TÉCNICA DE RUIDO ELECTROQUÍMICO A LOS ESTUDIOS DE CORROSIÓN», *Tesis Dr.*, p. 234.
- [8] L. J. P. Quintana, «Tratamientos superficiales de aceros y fundiciones de hierro empleando recubrimientos en base titanio para mejorar propiedades tribológicas».
- [9] R. C. Davies y S. J. Scouse, «The History and Development of Phosphate Coatings: With particular reference to the Applications of Parkerizing and Bonderizing», *Trans. IMF*, vol. 19, n.º 1, pp. 13-22, ene. 1943, doi: 10.1080/00202967.1943.11869416.
- [10] X. Yang, «Influence of Phosphating and Silicate Post-Sealing on Corrosion Behavior of Rebar Steel as Construction Material in Sodium Chloride Solution», *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 17, n.º 2, p. 220219, feb. 2022, doi: 10.20964/2022.02.80.
- [11] Real Armería de Madrid y J. B. C. y N. Valencia de Don Juan, *Catálogo histórico-descriptivo de la Real armería de Madrid*. Madrid, Fototipias de Hauser y Menet, 1898. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://archive.org/details/catlogohistorico00madrgoog>
- [12] A. de L. Martínez, D. P. Sánchez, y Á. Alcalde, *La fábrica de armas de Toledo*. Univ de Castilla La Mancha, 1999.
- [13] G. González-Cela Romero y J. (advisor) Eiras Barca, «Métodos de pavonado de acero : estudio teórico-práctico para implementación en talleres mecánicos de buques», abr. 2024, Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/789>
- [14] «El níquel», Clickmica. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://clickmica.fundaciondescubre.es/conoce/elementos-quimicos/el-niquel/>

- [15] J. M. Hernández y J. D. Gallego, «Deposición electrolítica de Níquel».
- [16] E. Howell, «Encuentran contaminación por cobre de 5,000 años de antigüedad cerca de las pirámides», Eos. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://eos.org/articles/5000-year-old-copper-pollution-found-near-the-pyramids-spanish>
- [17] «man-bol-1995-arias-sanchez.pdf». Accedido: 4 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.man.es/man/dam/jcr%3Aff8e3e2e-eea6-40e6-88be-dad3d8835dd3/man-bol-1995-arias-sanchez.pdf>
- [18] David Erasto García, «Diseño de estructuras de acero». Limusa.
- [19] A. J. Criado, J. A. Martínez, R. Calabrés, y D. Arias, «Fabricación del acero de Damasco: estudio metalográfico», *Rev. Metal.*, vol. 33, n.º 1, pp. 44-49, feb. 1997, doi: 10.3989/revmetalm.1997.v33.i1.878.
- [20] «Las espadas de Damasco». Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://losarchivosdelbardo.blogspot.com/2015/03/las-espadas-de-damasco.html>
- [21] E. G. Graßhof y M. Meyer, «The Coming of Iron in a Comparative Perspective».
- [22] M. E. P. Carrera, «ELABORACIÓN DE UN PROCEDIMIENTO PARA FUNDIR ACERO DE MEDIO CARBONO EN EL HORNO DE INDUCCIÓN PARA EL LABORATORIO DE FUNDICIÓN».
- [23] «Proceso Bessemer _ AcademiaLab». Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://academia-lab.com/enciclopedia/proceso-de-bessemer/>
- [24] Kennet Charles Barraclough, *Steelmaking*. en Matsci Series. institute of metals 1990.
- [25] M. Karbowniczek, *Electric Arc Furnace Steelmaking*, 1.ª ed. Boca Raton: CRC Press, 2021. doi: 10.1201/9781003130949.
- [26] «Steelmaking_and_Refining_Volume_AISE_199».
- [27] W. R. Irving, *Continuous Casting of Steel*. CRC Press, 2024.
- [28] «El alto horno – Tareas Universitarias». Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tareasuniversitarias.com/el-alto-horno.html>
- [29] U. Tyler, «10 Intriguing Facts About Bessemer Process», Facts.net. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://facts.net/science/chemistry/10-intriguing-facts-about-bessemer-process/>
- [30] «Practical Maintenance » Blog Archive » Iron and Steel». Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://practicalmaintenance.net/?p=1279>
- [31] trista, «Colada Continua», SlideServe. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.slideserve.com/trista/colada-continua>
- [32] P. H. Illán, «Tesla Optimus Gen 2, el robot en desarrollo de Elon Musk, muestra sus nuevos avances», Andro4all. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/andro4all/tecnologia/tesla-optimus-gen-2-el-robot-en-desarrollo-de-elon-musk-muestra-sus-nuevos-avances>
- [33] S. Srinivasan, «Industry 4.0 - Industrial IoT Solutions India - MELSS». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.melss.com/industry-4-0/>
- [34] «DAVID ERASTO GARCIA».
- [35] Elodino Meléndez «PROCESOS SIDELÚRGICOS». Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/83080077.pdf>
- [36] I. O. Acuña Gutiérrez, D. M. Puente Siller, J. M. González De La Cruz, L. E. Álvarez García, J. A. López Corpus, y A. Perea Garduño, «Procesamiento de polvos de colector de alto horno para su aprovechamiento en la industria siderúrgica», *Rev. Cienc. TECNOLÓGICAS*, vol. 7, n.º 3, p. e277, jul. 2024, doi: 10.37636/recit.v7n3e277.
- [37] Ó. M. Llorente, «EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE LA COLADA CONTINUA EN LA FABRICACIÓN DE ACERO».
- [38] J. D. M. Écija, «Santa Bárbara trata de protegerse de Indra: refuerza la fábrica asturiana del VCR 8X8 Dragón con una inversión de 50 millones». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.msn.com/es-es/dinero/empresas/santa-b%C3%A1rbara-trata-de->

- protegerse-de-indra-refuerza-la-f%C3%A1brica-asturiana-del-vcr-8x8-drag%C3%B3n-con-una-inversi%C3%B3n-de-50-millones/ar-AA1APJhv
- [39] «Principales Programas de Armamento». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20080423050937/http://www.mde.es/dgam/principalesprogramasaym.htm#T1>
- [40] «Navantia inicia en Ferrol las obras de la Fábrica Digital de Bloques». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.economiadigital.es/galicia/empresas/navantia-inicia-en-ferrol-las-obras-de-la-de-la-fabrica-digital-de-bloques.html>
- [41] «Navantia pone la quilla de la primera fragata F110 en el astillero de Ferrol», Navantia. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/actualidad/notas-prensa/navantia-pone-la-quilla-de-la-primera-fragata-f110-en-el-astillero-de-ferrol/>
- [42] «Programa S80: El submarino S-82 cumple el primer hito de seguridad con la puesta en tensión», Navantia. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.navantia.es/es/actualidad/notas-prensa/programa-s80-el-submarino-s-82-cumple-el-primer-hito-de-seguridad-con-la-puesta-en-tension/>
- [43] «Mabey Compact 200», Mabey Bridge. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mabeybridge.com/es/productos/mabey-compact-200/>
- [44] R. D. InfoDefensa, «Santa Bárbara Sistemas entrega otros cuatro vehículos de zapadores Castor al Ejército de Tierra español», Infodefensa - Noticias de defensa, industria, seguridad, armamento, ejércitos y tecnología de la defensa. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/5094866/santa-barbara-sistema-entrega-otros-cuatro-vehiculos-zapadores-castor-ejercito-tierra-espanol>
- [45] TEDAE, «El Ejército de Tierra Español ha adjudicado a GDELS Santa Bárbara Sistemas un acuerdo marco para el mantenimiento de los 72 obuses», TEDAE. Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://tedae.org/defensa/el-ejercito-de-tierra-espanol-ha-adjudicado-a-gdels-santa-barbara-sistemas-un-acuerdo-marco-para-el-mantenimiento-de-los-72-obuses/>
- [46] «AMAP Protection System». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://web.archive.org/web/20100106002208/http://defense-update.com/products/a/amap.htm>
- [47] O. Acevedo-Sandoval, E. Ortiz-Hernández, y M. Cruz-Sánchez, «EL PAPEL DE ÓXIDOS DE HIERRO EN SUELOS», 2004.
- [48] Instituto Tecnológico de materiales, «Curso Metalurgia. propiedades y tipos de acero». Fundación itma, 2004.
- [49] «et_01494_insumos_fosfato_para_mantenimiento.pdf». Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ejercito.mil.co/enio/recurso_user/doc_contenido_pagina_web/800130633_4/623001/et_01494_insumos_fosfato_para_mantenimiento.pdf
- [50] D. Biographie, «Reuß, Ferdinand Friedrich von - Deutsche Biographie». Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.deutsche-biographie.de/pnd116453672.html#adbcontent>
- [51] C. J. C. Biscombe, «The Discovery of Electrokinetic Phenomena: Setting the Record Straight», *Angew. Chem. Int. Ed.*, vol. 56, n.º 29, pp. 8338-8340, 2017, doi: 10.1002/anie.201608536.
- [52] «Tacsá-2024-Cataforesis-ES-1.pdf». Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.tacsá.com/wp-content/uploads/2024/06/Tacsá-2024-Cataforesis-ES-1.pdf?utm_
- [53] J. E. Quiñonez y A. L. Hernández, «Nuevo recubrimiento selectivo caliente: preparación y caracterización», *Energ. Renov. Medio Ambiente*, vol. 43, pp. 39-49, nov. 2019.
- [54] Carlos Orozco Hernandez «Manual galvanotécnico de los procesos de niquelado cobrizado y cromado», tesis. Accedido: 14 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ru.dgb.unam.mx/bitstream/20.500.14330/TES01000185814/3/0185814.pdf?utm_

- [55] A. Garces, «Descripción del proceso de zincado», *Zincado Met. Revisión Bibliográfica*, ene. 2020, Accedido: 15 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/78075339/Descripci%C3%B3n_del_proceso_de_zincado
- [56] J. González Martín, «La pintura como inhibidor de corrosión en las estructuras de acero especialmente expuestas y su rendimiento», *Inf. Constr.*, vol. 51, n.º 461, pp. 9-17, jun. 1999, doi: 10.3989/ic.1999.v51.i461.846.
- [57] «EL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES SI».
- [58] «Ficha-Tecnica-TECNAN-BLUE-1.pdf». Accedido: 10 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://tecnan-nanomat.es/wp-content/uploads/2023/01/Ficha-Tecnica-TECNAN-BLUE-1.pdf?utm_
- [59] «Google Earth». Accedido: 11 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://earth.google.com/web/@42.3974363,-8.70898672,-0.80659626a,814.60927085d,35y,0.00000001h,5.21116786t,-0r/data=CgRCAggBOgMKATBCAggASgOI_____ARAA
- [60] Contando Estrelas, *Escuela Naval Militar de Marín*. 2010. Accedido: 11 de marzo de 2025. [Photo]. Disponible en: <https://www.flickr.com/photos/elentir/4832011499/>
- [61] «Tiempo de Pontevedra en marzo 2025», tiempo3.com. Accedido: 22 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.tiempo3.com/europe/spain/galicia/pontevedra?page=month&month=March>

7 ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El presente estudio sobre los diferentes acabados superficiales, presenta diversas implicaciones que pueden ser analizadas desde una perspectiva más amplia, considerando su potencial impacto en ámbito social, económico y ambiental. Destacar antes de todo, que el presente trabajo al tratarse de un análisis de los tratamientos superficiales, directamente no presenta repercusiones sociales, económicas o ambientales.

Desde el punto de vista social, aunque el trabajo se inscribe dentro del ámbito técnico y académico, su desarrollo puede influir en la formación de futuros ingenieros y técnicos especializados en la industria naval. La adquisición de conocimientos avanzados sobre tratamientos de superficies metálicas fortalece el capital humano y fomenta el desarrollo de habilidades que pueden aplicarse en otros sectores industriales, contribuyendo así al crecimiento profesional y tecnológico del país.

En cuanto a la dimensión económica, la optimización de técnicas de pavonado podría traducirse en una mayor eficiencia operativa dentro de los talleres de mantenimiento naval. Si bien la investigación no tiene un enfoque comercial inmediato, los conocimientos generados podrían contribuir a mejorar la durabilidad y resistencia de los materiales tratados, disminuyendo la frecuencia de mantenimiento y reemplazo de piezas metálicas.

Desde la perspectiva ambiental, es importante considerar que, si bien algunos de los tratamientos no generan residuos peligrosos en grandes volúmenes, la elección de materiales y métodos más sostenibles podría reducir aún más su impacto ecológico. De todos los tratamientos empleados, los que mayor impacto ambiental pueden producir son, en primer lugar el fosfatado debido a los gases que produce el fosfatante así como el propio líquido que posee elementos metálicos en disolución en su interior. Y finalmente, tanto el pintado como el pavonado Tecnanblue™ y como el zincado en frío, al tratarse de agentes con aerosol, que contienen hidrocarburos que se liberan al medio junto con el producto. La investigación en alternativas menos contaminantes y la implementación de procesos optimizados pueden contribuir a minimizar la huella ambiental de los talleres de la Armada, alineándose con estrategias de sostenibilidad en la industria naval.

En conclusión, aunque este estudio tiene un carácter predominantemente técnico, su desarrollo puede generar efectos indirectos en la formación profesional, la eficiencia económica y la gestión ambiental dentro del sector naval.

8 ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El estudio de la resistencia a la corrosión de los diferentes acabados superficiales va más allá del análisis técnico, abarcando la seguridad laboral y la responsabilidad social.

En primer lugar, es crucial garantizar que los procedimientos no representen riesgos para los trabajadores, aplicando protocolos de seguridad y medidas de protección adecuadas y uso responsable de los aparatos empleados para realizar estos acabados. Asimismo, el cumplimiento de normativas en seguridad industrial y calidad es esencial para preservar la integridad en los talleres o buques y evitar sanciones.

En conclusión, la investigación debe considerar no sólo la eficacia de todos estos métodos, sino también la protección de la salud, la regulación y la ética en su aplicación.

9 ANEXO III: ESTUDIO DE ACABADOS EN EL PCMAYMA

El PCMAYMA (Parque y Centro de Mantenimiento de Armamento y Material de Artillería) se encuentra en Valladolid, ubicado en el Pinar de Antequera. El origen de este acuartelamiento data de los años 30 y pertenece orgánicamente al MALE (Mando de Apoyo Logístico del Ejército de Tierra). En él, se realiza el mantenimiento de pistolas, fusiles de asalto, ametralladoras, lanzagranadas, morteros y otras piezas de artillería de campaña que utilizan las Fuerzas Armadas.

Dentro de los procesos de mantenimiento que se realizan, destacan los tratamientos superficiales del acero. Más concretamente, los tratamientos más comunes son el fosfatado y otros tratamientos como el pavonado o pintado de las piezas.

Estos tratamientos se encuentran dentro del objeto de estudio del trabajo de fin de grado del análisis comparativo de los efectos de la corrosión en acero con los diferentes acabados superficiales. Por esta razón, se llevó a cabo una visita oficial a la base en la que se tuvo la oportunidad de estudiar el desmontaje de piezas, preparado del acero pretratamiento y tratamientos. Estos conocimientos sirven para aplicar el método que se emplea en un parque de este calibre a pequeña escala en el laboratorio y, además, la concienciación de lo presente que se encuentran en la industria estos tratamientos del acero.

En primer lugar, se visita el taller de desmontaje y montaje de piezas de gran calibre entre las que destacan el Otto Melara Mod. 56 y el Santa Bárbara Sistemas 155/52.



**Figura A3 - 3 Santa Bárbara
Sistemas 155/52 (Elaboración
Propia)**



**Figura A3 - 2 Desmontaje de varias
piezas de artillería de diferentes
calibres**



**Figura A3 - 1 Cañón Otto
Melara Mod. 56 (Elaboración
Propia)**

En esta sección se lleva a cabo el desmontaje de las piezas (ilustración 1) y el curado y posterior montaje una vez realizados los tratamientos superficiales (ilustraciones 2 y 3). La planta se divide en dos líneas principales por las cuales avanzan las piezas desmontadas y en los laterales, se encuentran las piezas que ya han sido tratadas en proceso de curación, espera y montaje.

Para poder llevar el seguimiento de los lotes a los que se les aplican determinados mantenimientos, el parque cuenta con un sistema de tarjetas en las que se especifican los tratamientos ya realizados y los

que faltan por hacer. Estas tarjetas son similares a las tarjetas de enrutamiento empleadas en el ámbito de la ingeniería civil.

A continuación, se encuentran los talleres dedicados a las armas de menor calibre, tales como ametralladoras ligeras y pesadas, lanzagranadas, fusiles de precisión... etc. En esta parte, los operarios se encargan de desmontar completamente cada arma llevando a cabo una revisión exhaustiva del estado de cada pieza y la separación de estas piezas dependiendo del tamaño y forma de cada una. En el caso de encontrar piezas defectuosas o que requieran de un mecanizado, se identifican los defectos a corregir y se envían al taller de fresado y pulido.

Es fundamental realizar un adecuado desengrasado y seleccionar la técnica de preparación del metal más apropiada. Además, en esta sección, también se realiza el montaje y comprobación de funcionamiento de los mecanismos una vez terminados los tratamientos superficiales.



Figura A3 - 5
Desmontaje y separación
bípodes



Figura A3 - 4
Desmontaje ametralladora
Browning 12,7mm

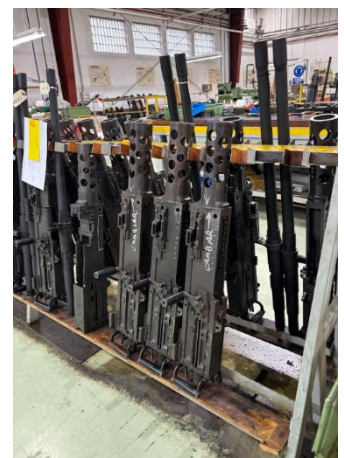


Figura A3 - 6 Separación
por tipo de piezas Browning

En esta sección se comienza con el seguimiento de una serie de MG3. Este modelo es la evolución moderna de la MG42 empleada por Alemania durante la Segunda Guerra Mundial (1942) de la que realiza el seguimiento completo del proceso desde que se recibe el lote de armamento proveniente de las unidades, su desmontaje, preparación del metal, tratamiento y curación.



Figura A3 - 7 Ametralladora ligera MG3 desmontada y preparada para su desengrasado

Una vez desmontadas, las piezas pasan a la sección de desengrasado. Se emplea perclororetileno. Un químico que, mediante su evaporación, elimina la grasa de las piezas. El proceso de desengrasado es el de mayor duración. El tiempo estimado es de 3 horas, pero, al tratarse de un químico nocivo, la máquina no debe abrirse hasta 24 horas después del tratamiento para que se eliminen las partículas de perclorotileno.

Se emplean botellas de 200 litros de percloroetileno cuya duración aproximada es de 3 meses cada botella. Las piezas se cargan en un elevador en la parte posterior de la máquina que es capaz de portar varios cañones de AMP simultáneamente.



Figura A3 - 8 Estación de desengrasado en funcionamiento

Una vez pasan por la estación de desengrasado, las piezas deben pasar por arenado o granallado para limpiar completamente el metal de cualquier imperfección que pueda tener y se consigue obtener el acero completamente limpio y preparado para comenzar los tratamientos superficiales que se le van a impartir.



Figura A3 - 10 Máquina de arenado



Figura A3 - 11 Máquina de arenado operada por el operador para la limpieza de la parte exterior de la serie de MG3

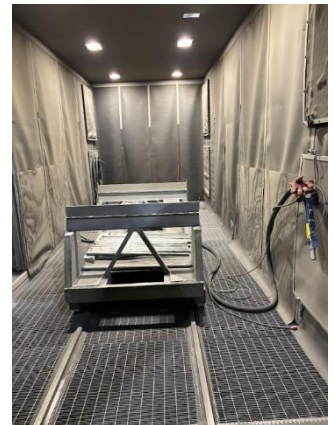


Figura A3 - 9 Estación de granallado con los cañones del 12,7mm

La diferencia entre arenado y granallado radica en el tipo de grano que se emplea. En el caso del arenado, los granos son de arena tipo M50 mientras que para el granallado se emplean granos metálicos de hierro de mayor tamaño. Además, en las máquinas de arenado de las que dispone el parque, el operador solo debe introducir los brazos en unos guantes especiales para manipular la pieza y dirigir el chorro de arena, mientras que para el granallado, el operario debe estar por completo dentro del

habitáculo con libertad de movimiento para llegar a todas las partes de las piezas con la manguera de granalla.



**Figura A3 - 12 Granos de granalla
junto a cañón 12,7mm**



**Figura A3 - 13 Estado final tras arenado /
granallado**

Una vez que se ha realizado la limpieza, es de vital importancia no tocar las piezas con las manos para evitar que queden restos de grasa. Además, al encontrarse el metal en su estado original, es extremadamente vulnerable a la oxidación por lo que el tiempo entre el arenado o granallado del metal y el tratamiento que se le vaya a dar a cada pieza, debe ser mínimo.

Para las piezas a pavonar, el desengrase que se utiliza en lugar del perclorotileno, es el desengrase alcalino con sosa cáustica. Además, como método de limpieza del metal, se emplean una serie de rodillos con lijas, cepillos y por último material textil para el pulido.



**Figura A3 - 14 Rodillos de limpieza de piezas
para pavonado**



**Figura A3 - 15 Tanque de desengrase
alcalino**

A partir de este punto se diferencia la línea de piezas que van a fosfatado tradicional, aquellas que emplean el *wash primer fosfatante* y aquellas que se van a pavonar.

1. Fosfatado común

El químico que se emplea es el fosfatium 40. Este debe estar entre 85 y 90°C para asegurar un buen fosfatado. El baño debe limpiarse de posibles contaminantes presentes en la superficie y posteriormente se sumergen las piezas entre 15 y 30 minutos prestando especial atención a que las piezas no estén en contacto entre ellas.

Una vez pasado el tiempo, se sumergen en un baño de agua a 80°C para eliminar los restos de agente fosfatante presentes y a continuación se divide en dos procesos a continuación: las piezas que no necesitan ser pintadas, se sumergen en un baño de una emulsión de aceite durante medio minuto mientras que, las piezas que van a ser pintadas, pasan directamente a la planta de pintado sin el baño de aceite.



Figura A3 - 17 Inmersión de las piezas en fosfatium 40



Figura A3 - 16 Resultado tras fosfatado

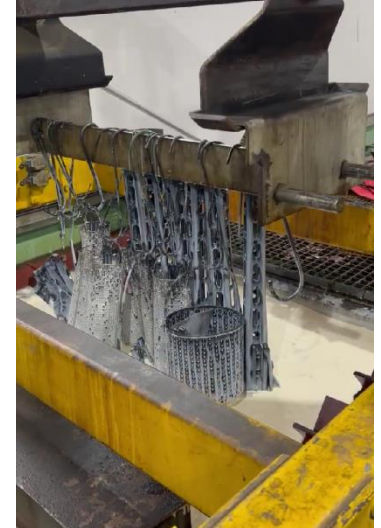


Figura A3 - 18 Inmersión en emulsión de aceite tras fosfatado

2. Fosfatado wash primer

El fosfatado wash primer se emplea para aquellas piezas que, por sus dimensiones, no entran en los baños. Este agente fosfatante es un químico similar al fosfatante que funciona de forma similar a una pintura; primero se le aplica una imprimación epoxi de poliamida a la pieza y a continuación, sobre ella se aplica el wash primer fosfatante 871. Al cabo de 20 minutos se puede aplicar una segunda capa y posteriormente, mediante un catalizador y un esmalte, se aplica la pintura deseada.

La pintura empleada para este tipo de piezas suele ser pintura semi mate de color caqui M12 y, además, poseer la certificación que asegura la reducción de la firma infrarroja de la pieza.



Figura A3 - 19 Producto wash primer fosfatante



Figura A3 - 20 Productos tratamiento tras el fosfatado

3. Pavonado

Para el pavonado se emplea el producto Rinoclean P450 que debe estar a una temperatura de 135°C. Una vez sumergidas las piezas, se espera a que alcance los 145°C y en menos de un minuto, deben sacarse del baño, sumergirse en agua fría y seguidamente dejar sumergidas las piezas en agua caliente entre 70 y 80°C durante 10 minutos. En este proceso, al contrario que para el fosfatado, cuantos más procesos se han realizado en la misma mezcla, mejores son los resultados. En el fosfatado, cada 15 días es necesario realizar controles de calidad de la mezcla de los tanques.



Figura A3 - 21 Estación pavonado, tanque agua caliente, tanque agua fría, tranque pavonado (de izquierda a derecha)

Por último, se muestra a continuación la comparativa entre diferentes piezas antes y después de todo el proceso de tratamiento superficial:



Figura A3 - 22 Bípodes desmontados



Figura A3 - 23 Bípodes listos para montaje y envío



**Figura A3 - 25 Cañón 12,7mm
preparado para desengrasado**



**Figura A3 - 24 Cañón
12,7mm fosfatado y aceitado**

Para las piezas de mayor tamaño que tienen partes soldadas, antes de realizar los tratamientos superficiales, tras el granallado, se realiza una comprobación de las soldaduras mediante líquidos penetrantes antes de aplicar los tratamientos superficiales. Este procedimiento permite detectar posibles defectos en las soldaduras, los cuales se corrigen antes de proceder con el fosfatado.



**Figura A3 - 26
Comprobación de soldaduras
con líquido penetrante**



**Figura A3 - 28 Montaje de
la tras tratamiento superficial**



**Figura A3 - 27 Pieza de artillería montada y
operativa**

Por último en el final de la visita, destaca la sección I+D en la que los operarios trabajan con diferentes sistemas de impresión en 3D para obtener moldes apropiados para fresado y mecanizado de ciertas piezas. De estos sistemas se destaca una impresora de acero inoxidable la cual opera a altas temperaturas para fabricar piezas macizas que posteriormente requieren un mecanizado para obtener un acabado adecuado para su uso.

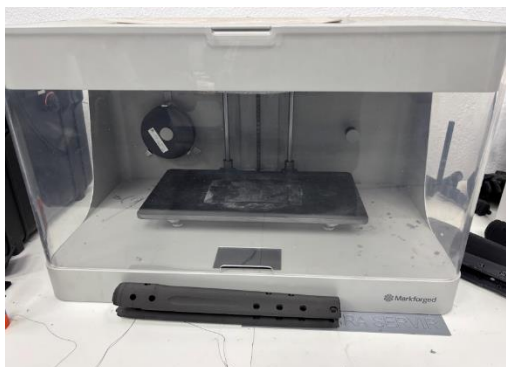


Figura A3 - 29 Máquina de impresión 3D con su respectiva impresión de una parte del cañón de una AML

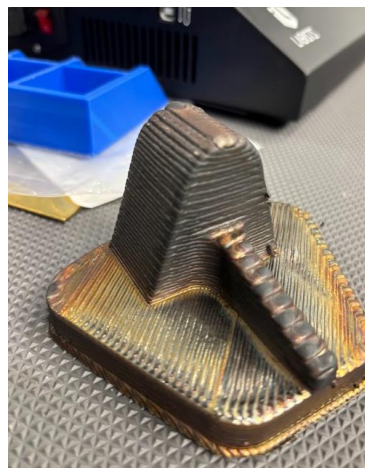


Figura A3 - 30 Pieza de impresión 3D en acero inoxidable sin mecanizar

10 ANEXO IV: CÁLCULO DE pH CÁMARAS SALINAS

Cálculos de Ph para alcanzar un pH de 10,5 en la cámara salina de condiciones básicas.

$$pH \text{ agua salada} = 6,5$$

$$pH = -\log[H^+]$$

$$[H^+] = 10^{-pH}$$

$$[H^+]_{inicial} = 3,162 * 10^{-7}$$

$$pH_{objetivo} = 2; [H^+]_{final} = 10^{-2}$$

$$\Delta[H^+] = [H^+]_{final} - [H^+]_{inicial}$$

$$\Delta[H^+] = 0,01 - 3,162 * 10^{-7} \approx 0,01M$$

$$\text{moles de } H^+ = \Delta[H^+] * V$$

$$\text{moles de } H^+ = 0,01 M * 2 l = 0,02 \text{ mol de } H^+$$

$$HCl = H^+ + Cl^- \Rightarrow 0,02 \text{ mol de } H^+ = 0,02 \text{ mol de } HCl$$

$$\text{masa molar } HCl = 1 + 35,5 = 36,5 \frac{g}{mol} HCl$$

$$0,02 \text{ mol de } HCl * 36,5 \frac{g}{mol} HCl = 0,73g \text{ de } HCL$$

$$\text{Salfumant } \textcircled{R} (23\% \text{ de } HCl) \Rightarrow \frac{0,73 g \text{ de } HCL}{0,23} = 3,17g \text{ de Salfumant } \textcircled{R}$$

Cálculos de Ph para alcanzar un pH de 10,5 en la cámara salina de condiciones básicas.

$$pH \text{ agua salada} = 6,5$$

$$pH + pOH = 14$$

$$pOH_{inicial} = 14 - 6,5 = 7,5$$

$$[OH^-] = 10^{-pOH}$$

$$[OH^-]_{inicial} = 10^{-7,5} = 3,162 * 10^{-8}$$

$$pOH_{objetivo} = 14 - 10,5 = 3,5; [OH^-]_{final} = 10^{-3,5} = 3,162 * 10^{-4}$$

$$\Delta[OH^-] = [OH^-]_{final} - [OH^-]_{inicial}$$

$$\Delta[OH^-] = 3,162 * 10^{-4} - 3,162 * 10^{-8} \approx 3,162 * 10^{-4} M$$

$$moles\ de\ OH^- = \Delta[OH^-] * V$$

$$moles\ de\ OH^- = 3,162 * 10^{-4} M * 2\ l = 6,32 * 10^{-4}\ mol\ de\ OH^-$$

$$NaOH = Na^+ + OH^- \Rightarrow 6,32 * 10^{-4}\ mol\ de\ OH^- = 6,32 * 10^{-4}\ mol\ de\ NaOH$$

$$masa\ molar\ NaOH = 23 + 16 + 1 = 40\ \frac{g}{mol}\ NaOH$$

$$6,32 * 10^{-4}\ mol\ de\ NaOH * 40\ \frac{g}{mol}\ NaOH = 0,0253g\ de\ NaOH$$