



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Métodos de pavonado de acero: estudio teórico- práctico para
implementación en talleres mecánicos de buques*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Gerardo González-Cela Romero

DIRECTORES: Jorge Eiras Barca

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Métodos de pavonado de acero: estudio teórico-práctico para
implementación en talleres mecánicos de buques*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El tratamiento y cuidado de piezas y armas en los buques de la Armada es una tarea tediosa, regular y fundamental para asegurar el correcto funcionamiento de todos los sistemas, lo que permite mantener la capacidad operativa de nuestras unidades y asegurar el cumplimiento de la misión.

En el presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se plantea, en primer lugar, un estudio teórico de las características de los principales métodos de pavonado del acero. En segundo lugar, un estudio práctico de las propiedades de aquellos métodos de pavonado que se hayan seleccionado, desde su resistencia contra la oxidación, hasta su acabado y dificultad de realización. Para ello, las muestras se someten a diferentes entornos de estrés, altamente corrosivos, para estudiar su comportamiento. Finalmente, se realiza un análisis de los resultados obtenidos de las muestras, teniendo como meta la elección de uno de estos procesos para su aplicación en los buques de guerra de la Armada.

Este trabajo concluye que el método de pavonado químico alcalino destaca como la opción preferida debido a su estética superior, resistencia excepcional y eficiencia económica a largo plazo. Aunque puede requerir una implementación más apropiada para un taller de un buque, por los gases tóxicos generados durante el proceso, sus beneficios en términos de durabilidad y calidad estética hacen que sea la elección ideal cuando sea posible. Sin embargo, en situaciones donde la implementación del Método 3 no sea factible, se puede considerar como alternativa el método de ácido comercial, cuando la estética prime sobre la resistencia; y clásico en aceite cuando la resistencia prime sobre la estética. El método de óxido rojo se descarta por proporcionar los peores resultados y por el elevado tiempo requerido.

PALABRAS CLAVE

Pavonado, oxidación, análisis, idoneidad, Armada

AGRADECIMIENTOS

“Es de bien nacido, ser agradecido”

Es bien sabido que, tras cinco años de formación en la Escuela Naval Militar, todo termina completando este proyecto. Por ello, me gustaría agradecer a mi tutor, D. Jorge Eiras Barca, por su guía, consejos y paciencia para poder completar este último trabajo de mi etapa de alumno con éxito. Ante todo, limpieza.

De acuerdo con lo anterior, me gustaría agradecerle también al TN D. Pedro Carrasco Pena, por su implicación en este proyecto, principalmente por habernos facilitado las piezas con las que, posteriormente, trabajaríamos. Además, por su implicación durante los procesos que tantos problemas dieron.

Al Sgto. D. César Manzanares, artillero del J.S. Elcano que, durante la navegación, dedicó parte de su tiempo a aportar su experiencia y conocimientos sobre el asunto para poder enriquecer este proyecto. De igual manera, a los dos alumnos de segundo curso por haber colaborado en la toma de imágenes durante las semanas de exposición.

En la misma línea, a aquellas empresas metalúrgicas mencionadas en este documento, que aportaron desinteresadamente sus experiencias trabajando con el pavonado, y que estuvieron disponibles para consultas siempre que se les escribió.

Para terminar, agradecer a todos los docentes del CUD y militares que se han implicado en nuestra formación científica, técnica y en valores, como futuros oficiales. Y a los integrantes de mi estudio, por crear un ambiente propicio para trabajar.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Contexto y motivación	7
1.1.1 Materiales en la construcción naval.....	7
1.1.2 Clasificación de los aceros.....	8
1.1.3 La corrosión	8
1.1.4 Métodos de recubrimiento por pasivación.....	10
1.1.5 El pavonado	11
1.1.5.1 La magnetita.....	12
1.1.5.2 Ventajas y desventajas	13
1.1.5.3 Métodos de pavonado	13
1.2 Objetivos y metodología	14
1.3 Estructura de la memoria	14
2 Estado del arte	16
2.1 El acero	16
2.1.1 Fabricación del acero	17
2.1.2 Acero en la construcción naval.....	18
2.2 Oxidación del acero	18
2.2.1 Concienciación en la armada	19
2.3 Métodos de protección contra la oxidación	19
2.3.1 Métodos de protección actuales.....	20
2.4 Pavonado.....	21
2.4.1 Contexto histórico.....	21
2.4.2 El pavonado en la actualidad	23
2.4.2.1 Sector empresarial.....	23
2.4.2.2 Restauración de piezas y armas oxidadas	24
2.4.2.3 Armada.....	25
2.5 Trayectoria del pavonado.....	26
3 Desarrollo del TFG.....	28
3.1 Método 1: Pavonado en frío con ácido comercial.....	29
3.1.1 Material necesario.....	29

3.1.2 Desarrollo del proceso	29
3.2 Método 2: Pavonado clásico en aceite	36
3.2.1 Material necesario.....	36
3.2.2 Desarrollo del proceso	36
3.3 Método 3: Pavonado químico alcalino.....	40
3.3.1 Material necesario.....	40
3.3.2 Desarrollo del proceso	40
3.4 Método 4: Pavonado en óxido rojo	45
3.4.1 Material necesario.....	45
3.4.2 Desarrollo del proceso	45
3.5 Metodología de la prueba de estrés	51
3.5.1 Entornos de estrés seleccionados	51
3.5.2 Microscopio Dino-Lite	53
4 Resultados	54
4.1 Lanchas de instrucción.....	54
4.1.1 Análisis microscópico: Lanchas de instrucción.....	56
4.2 Terraza del pañol de música.....	59
4.2.1 Meteorología durante la exposición.....	60
4.2.2 Análisis microscópico: Terraza	61
4.3 Piscina	64
4.3.1 Análisis microscópico: Piscina	65
4.4 En inmersión	68
4.4.1 Análisis microscópico: Muestras sumergidas.....	69
5 Conclusiones y líneas futuras	72
5.1 Conclusiones del trabajo	72
5.1.1 Grado de satisfacción.....	73
5.1.2 Método idóneo para ser aplicado en taller naval	74
5.2 Líneas académicas.....	75
5.2.1 Mejoras	75
5.2.2 Líneas futuras.....	75
6 Bibliografía.....	77
Anexo I: Implicaciones sociales, y/o económicas, y/o ambientales.....	80
Anexo II: Reflexiones éticas y sociales.....	81
Anexo III: Resumen de los métodos de pavonado	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Sistema Sentinel 2.0 de la fragata “Victoria” (EM&E) (tomada de [4])	8
Figura 1-2. Desmontaje del domo de una F-100 para comprobación de corrosión (tomada de [12]).....	10
Figura 1-3. Métodos de recubrimiento por pasivación (elaboración propia)	11
Figura 1-4. Resultados del proceso de pavonado en el cierre de un arma corta (tomada de [18])	12
Figura 1-5. Diagrama de Pourbaix Fe-H ₂ O (tomada de [24])	12
Figura 2-1. Diagrama de equilibrio del sistema Fe-C (tomada de [31])	17
Figura 2-2. Fusil británico, Brown Bess, utilizado en 1722 (tomada de [42])	22
Figura 2-3. Pareja de pistolas decoradas empleando el pavonado (tomada de [44]).....	22
Figura 2-4. Armadura de acero pavonado, de Felipe III niño. (tomada de [45]).	23
Figura 2-5. Tornillo de presión de apoyo pavonado para su comercialización (proporcionada por [48])	24
Figura 2-6. Carabina Huracán oxidada (tomada de [49]).....	24
Figura 2-7. Misma Carabina Huracán restaurada utilizando pavonado (tomada de [49]).....	25
Figura 2-8. Ilustración del proceso de pulverización catódica (tomada de [56])	27
Figura 3-1. Ácido comercial Ballistol® 50 mL (tomada de [59]).....	29
Figura 3-2. Acetona comercial utilizada como desengrasante de las piezas (elaboración propia).....	30
Figura 3-3. Proceso de remoción de impurezas de la pieza de acero (elaboración propia).....	30
Figura 3-4. Piezas de acero después del proceso de pulido y desengrasado (elaboración propia)	31
Figura 3-5. Pieza de acero tras la aplicación uniforme del ácido comercial (elaboración propia)	31
Figura 3-6. Pieza de acero tras secarla utilizando la pistola de calor (elaboración propia).....	32
Figura 3-7. Pieza de acero, una vez removido todo el excedente de óxido (elaboración propia)	32
Figura 3-8. Clavo sobre el que se aplicó una capa de pavón y se dejó a la intemperie (elaboración propia).....	35
Figura 3-9. Piezas de acero sujeta por un alambre (elaboración propia).....	36
Figura 3-10. Proceso de calentamiento de la pieza hasta alcanzar los 300°C (elaboración propia)	37
Figura 3-11. Pieza de acero, enfriada tras haberla calentado, sumergida en aceite de motor (elaboración propia)	38
Figura 3-12. Repetición del proceso de calentamiento (elaboración propia)	38
Figura 3-13. Acabado de pavonado al aceite, se aprecia el tono azulado (elaboración propia)	39
Figura 3-14. Proceso de calentamiento de la mezcla (elaboración propia).....	41
Figura 3-15. Introducción de las piezas en la mezcla (elaboración propia)	42
Figura 3-16. Piezas sumergidas en agua destilada hirviendo (elaboración propia).....	42
Figura 3-17. Enfriamiento de las piezas en la mezcla de pavonado (elaboración propia)	43
Figura 3-18. Transformación de magnetita del pavonado en óxido de hierro (elaboración propia)	43
Figura 3-19. Finalización del pavonado, reposo de las piezas en aceite (elaboración propia)	44
Figura 3-20. Piezas de acero sumergidas en vinagre para activar reacciones químicas (elaboración propia)	46

Figura 3-21. Aplicación de oxidante sobre las piezas de acero (elaboración propia)	46
Figura 3-22. Piezas de acero tras el secado con pistola de calor (elaboración propia).....	47
Figura 3-23. Transformación de óxido de hierro (Fe_2O_3) en magnetita (Fe_3O_4) (elaboración propia).....	47
Figura 3-24. Microscopio Dino-Lite AM4515T5 (elaboración propia).....	53
Figura 4-1. Muestras en la cámara de máquinas tras cuatro semanas de exposición (elaboración propia).....	56
Figura 4-2. Piezas depositadas en la terraza el 3 de marzo (elaboración propia).....	59
Figura 4-3. Muestra de la terraza tras cuatro semanas de exposición (elaboración propia)	60
Figura 4-4. Resumen de la meteorología durante el mes de marzo (tomada de [61]).....	60
Figura 4-5. Muestras depositadas en la piscina (elaboración propia)	64
Figura 4-6. Muestras de la piscina tras cuatro semanas de exposición (elaboración propia)	65
Figura 4-7. Piezas antes de ser sumergidas en el pantalán (elaboración propia).....	68
Figura 4-8. Piezas sumergidas en el pantalán (elaboración propia)	68
Figura 4-9. Muestras retiradas tras cuatro semanas sumergidas (elaboración propia)	69
Figura 5-1. Metodología seguida para alcanzar los objetivos en el trabajo (elaboración propia)	72
Figura 5-2. Sistema de calificación de las propiedades de los procesos de pavonado (elaboración propia).....	73
Figura 5-3. Resultado de los distintos procesos de pavonado según idoneidad (elaboración propia).....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Clasificación de los aceros según composición química (Elaboración propia)	8
Tabla 1-2. Coste Global de Corrosión por sectores económicos por país (tomada de [4], traducida)	10
Tabla 1-3. Métodos de pavonado (elaboración propia).....	14
Tabla 2-1. Precio de los principales metales del mercado (elaboración propia)	16
Tabla 2-2. Comparación entre acabados en acero (elaboración propia)	21
Tabla 3-1. Métodos de pavonado para realizar y número de piezas (elaboración propia)	28
Tabla 3-2. Iteraciones y resultado final del pavonado ácido comercial (elaboración propia).....	34
Tabla 3-3. Iteraciones y resultado final del pavonado en óxido rojo (elaboración propia)	50
Tabla 3-4. Entornos de Estrés a las que se someterán las muestras (elaboración propia).....	53
Tabla 4-1. Distribución piezas de acero depositadas en las lanchas de instrucción (elaboración propia).....	55
Tabla 4-2. Análisis microscópico de la muestra original de las lanchas de instrucción (elaboración propia)	56
Tabla 4-3. Análisis microscópico del Método 1 de las lanchas de instrucción (elaboración propia).....	57
Tabla 4-4. Análisis microscópico del Método 2 de las lanchas de instrucción (elaboración propia).....	57
Tabla 4-5. Análisis microscópico del Método 3 de las lanchas de instrucción (elaboración propia).....	58
Tabla 4-6. Análisis microscópico del Método 4 de las lanchas de instrucción (elaboración propia).....	58
Tabla 4-7. Análisis microscópico de la muestra original de la terraza (elaboración propia)	61
Tabla 4-8. Análisis microscópico del Método 1 de la terraza (elaboración propia).....	61
Tabla 4-9. Análisis microscópico del Método 2 de la terraza (elaboración propia).....	62
Tabla 4-10. Análisis microscópico del Método 3 de la terraza (elaboración propia).....	62
Tabla 4-11. Análisis microscópico del Método 4 de la terraza (elaboración propia).....	63
Tabla 4-12. Análisis microscópico de la muestra original de la piscina (elaboración propia)	65
Tabla 4-13. Análisis microscópico del Método 1 de la piscina (elaboración propia)	66
Tabla 4-14. Análisis microscópico del Método 2 de la piscina (elaboración propia)	66
Tabla 4-15. Análisis microscópico del Método 3 de la piscina (elaboración propia)	67
Tabla 4-16. Análisis microscópico del Método 4 de la piscina (elaboración propia)	67
Tabla 4-17. Análisis microscópico de la muestra original sumergida (elaboración propia)	69
Tabla 4-18. Análisis microscópico del Método 1 sumergido (elaboración propia)	70
Tabla 4-19. Análisis microscópico del Método 2 sumergido (elaboración propia)	70
Tabla 4-20. Análisis microscópico del Método 3 sumergido (elaboración propia)	71
Tabla 4-21. Análisis microscópico del Método 4 sumergido (elaboración propia)	71
Tabla 5-1. Calificación de las diferentes propiedades para los procesos de pavonado (elaboración propia)	73
Tabla A3-1. Resumen de los métodos de pavonado (elaboración propia)	84

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

1.1.1 Materiales en la construcción naval

En la construcción naval, la elección de materiales es fundamental, ya que tiene un gran impacto en la que será la futura superestructura, en su vida útil y por tanto en la propia operatividad del buque. En consecuencia, la innovación de la madera al acero desempeñó para la Armada un papel fundamental en su transformación y revitalización en la primera mitad del siglo XIX. La necesidad de renovar la flota y superar el retraso técnico era crucial para restablecer la posición histórica de España como potencia naval y es en este marco donde el acero juega un papel crucial en la aparición de los precursores de los buques actuales, los acorazados [1].

El acero es una aleación de hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos. Es uno de los materiales más utilizados en la industria y la construcción debido a sus propiedades mecánicas excepcionales. La adición de carbono al hierro le confiere al acero características como la resistencia, la dureza y la tenacidad, que son superiores a las del hierro puro. Por ello, a pesar de un material tradicional sigue siendo uno de los más solicitados en diversas aplicaciones [2].

La principal razón para la elección del acero para la construcción naval se encuentra en que, entre sus principales ventajas destaca su resistencia estructural que se mantienen a diferentes temperaturas que pueden variar entre los -40°C hasta 40°C . También hay que destacar su gran facilidad de conformado, ductilidad y soldabilidad [3].

Además, el acero no solo es utilizado en la superestructura del barco, sino que también lo podemos encontrar en anclas y cadenas, en herramientas de cubierta, en piezas mecánicas del motor y los elementos de propulsión, en equipos de maniobra y, en el caso de buques de guerra, en montajes y armamento (ver Figura 1-1).



Figura 1-1. Sistema Sentinel 2.0 de la fragata “Victoria” (EM&E) (tomada de [4])

1.1.2 Clasificación de los aceros

Debido a la existencia de diferentes normas y clasificaciones según el país de origen, es complicado establecer una clasificación precisa y completa para todos los tipos de aceros existentes. Igual de complicado es determinar una equivalencia exacta entre los aceros de diferentes denominaciones. En nuestro caso, según la norma UNE EN 10020:2001, y atendiendo a la composición química, los aceros se clasifican en:

Aceros no aleados			Aceros aleados		Aceros inoxidables
Aquellos en el que, a parte del carbono (C), el contenido de cualquiera de otros elementos aleantes es inferior a la cantidad mostrada en la tabla 1 de la UNE 10020:2001. Como elementos aleantes que se añaden están el manganeso, cromo, níquel, varadio o titanio.			Aquellos en los que además del carbono, al menos uno de sus otros elementos presentes en la aleación es igual o superior al valor límite dado en la tabla 1		Son aquellos aceros que contiene un mínimo del 10.5% en cromo y un máximo del 1.2% de carbono
Según el contenido de carbono			Según elementos aleantes		
Bajo carbono	Medio carbono	Alto carbono	Baja aleación	Alta aleación	
%C < 0.25	0.25 < % < C 0.55	2 >%C>0.55	elementos aleantes<5%	elementos aleantes<5%	

Tabla 1-1. Clasificación de los aceros según composición química (Elaboración propia)

En general, se entiende que el acero inoxidable es el que mejor resistencia presencia a la corrosión, su elevado coste relativo de producción, así como otras cuestiones relacionadas con su dureza y resistencia mecánica hacen que no sea el más común.

1.1.3 La corrosión

Antes de adentrarnos en la exposición del tema central de este trabajo, el pavonado, es fundamental profundizar en la comprensión de la corrosión. Esta es uno de los grandes problemas a los que se puede enfrentar un buque, pues éste navega por el electrolito natural, la mar. La pérdida de masa de los metales con menor potencial (ánodo), causada por la conformación de una gran pila de corrosión junto a la embarcación, con el mar como electrolito, da lugar a que la masa perdida sea transferida a los metales de mayor potencial (cátodo) [5]. Además, sin necesidad de estar en contacto con la mar, el entorno

marítimo, debido a la humedad y a la presencia de agentes corrosivos, es de por sí perjudicial para los metales.

La corrosión es un proceso físico/químico resultado de la interacción entre un material y su entorno, normalmente perjudicial para el material. Este proceso normalmente es asociado con materiales metálicos; sin embargo, afecta a todo tipo de materiales: metales, polímeros y cerámicos. Algunos ejemplos incluyen: transformación del acero en óxido, hinchamiento del PVC en contacto con un disolvente o ataque químico del vidrio mineral por una solución alcalina [6].

Dentro de nuestro contexto, los metales se diferencian de otros materiales por varias propiedades: ductilidad, alta resistencia a la tracción, resistencias a altas temperaturas, conductividad eléctrica y térmica, y facilidad de unión y mecanizado. Estos son elementos críticos de máquinas, aviones, automóviles, buques, industrias, estructuras y de dispositivos electrónicos. En consecuencia la durabilidad de los anteriores elementos dependerá, en parte, de la resistencia a la corrosión de sus componentes metálicos [7].

Se estima que en la actualidad la corrosión destruye una cuarta parte de la producción mundial de acero, lo que equivale a 150 millones de toneladas por año, o 5 toneladas por segundo [7]. Por poner algunos ejemplos en el ámbito económico, para Suiza esto representa el 4% del Producto Interior Bruto (PIB), es decir, varios miles de millones de euros al año invertidos en el reemplazo de materiales corroídos, en reparaciones, mantenimientos, inspecciones, en uso de materiales más caros resistentes a la corrosión o en la aplicación de recubrimientos superficiales [7]. La inversión económica debido a la corrosión en el caso de Estados Unidos es de cientos de miles de millones de dólares anualmente y de estos, 300 mil millones de dólares son invertidos en la corrosión de metales tanto de manera directa como de indirecta por año. Esto representa un 4.2% del PIB [8]. Para el caso de España las pérdidas se estiman en unos 36 mil millones de euros, cifra que equivale al 2% del PIB, según estudios realizados por NACE International [9].

Este estudio [10], publicado en 2016, comienza en octubre de 2014 donde NACE International inició el estudio Internacional de Medidas de Prevención, Aplicación y Economía de Tecnologías de la Corrosión (IMPACT); una iniciativa para examinar el papel de la gestión de la corrosión para el establecimiento de las mejores prácticas de la industria. El estudio IMPACT tenía como objetivos: (i) actualizar el costo global de la corrosión, (ii) evaluar las prácticas de gestión de la corrosión en diversas industrias y geografías, (iii) ofrecer una plantilla para la gestión de la corrosión en forma de un marco y pautas para un Sistema de Gestión de la Corrosión (CMS, por sus siglas en inglés), y (iv) proporcionar herramientas financieras que se pueden utilizar para calcular los costos del ciclo de vida. El coste global de la corrosión (CBC) en miles de millones de dólares se determina para cada zona económica por sectores financieros (ver Tabla 1-2).

Zonas Económicas	CBC Agricultura	CBC Industria	CBC Servicios	CBC Total	PIB Total	CBC %PIB
Estados Unidos	2.0	303.2	146.0	451.3	16,720	2.7%
India	17.7	20.3	32.3	70.3	1,670	4.2%
Europa	3.5	401	297	701.5	18,331	3.8%
Oriente Medio	13.3	34.2	92.6	140.1	2,789	5.0%
China	56.2	192.5	146.2	394.9	9,330	4.2%
Rusia	5.4	37.2	41.9	84.5	2,113	4.0%
Japón	0.6	45.9	5.1	51.6	5,002	1.0%

Asia Oriental	1.5	29.9	27.3	58.6	2,302	2.5%
Resto del Mundo	52.4	382.5	117.6	552.5	16,057	3.4%
Global	152.7	1446.7	906.0	2505.4	74,314	3.4%

Tabla 1-2. Coste Global de Corrosión por sectores económicos por país (tomada de [4], traducida)

Como se ha podido comprobar, la corrosión genera costos significativos en la industria, donde se incluye la industria naval [11]. Estos costos incluyen, por ejemplo, desperdicio de material, protección contra la corrosión, y gastos de mantenimiento y reparación. El entorno marino es altamente corrosivo debido a la alta humedad y la presencia de agentes corrosivos, como el cloruro de sodio. También hay muchos otros factores que varían según la ubicación y la época del año.

Debido al gran impacto que tiene este fenómeno en el ámbito naval, la Armada no puede desentenderse y debe de actuar en consecuencia combatiendo los perjuicios de la corrosión (ver Figura 1-2). Entre los diversos métodos que se mencionan en la Revista General de Marina, uno de los que se plantean es la protección por pasivación [12]. Por consiguiente, son necesarios métodos practicables en los talleres de los buques de la Armada; que permitan realizar pequeños mantenimientos a los distintos equipos y herramientas, teniendo como objetivo el de mantener su capacidad operativa durante largas navegaciones, y preservar el poder naval de España.



Figura 1-2. Desmontaje del domo de una F-100 para comprobación de corrosión (tomada de [12])

Por todas estas razones, los productos hechos de metal casi siempre están recubiertos con pintura u otros procesos; porque son necesarios métodos para mejorar la resistencia a la corrosión, a los productos químicos, al ambiente y a la oxidación. Además, estos recubrimientos aportan otras propiedades como: 1) potenciar estética del producto, 2) reforzar la resistencia al desgaste, 3) mejorar la conductividad eléctrica, 4) optimizar la resistencia eléctrica, 5) preparar una superficie metálica para futuros procesamientos y 6) restaurar superficies desgastadas o erosionadas durante su servicio [13]. Y es aquí donde se encuentra encuadrado, por primera vez en un TFG desde el Centro Universitario de la Defensa (CUD-ENM) [14], nuestro objeto de estudio por pasivación: el pavonado.

1.1.4 Métodos de recubrimiento por pasivación

La pasivación es un procedimiento o tratamiento electroquímico diseñado para disminuir la reactividad química de la superficie de un material. Este proceso crea una capa de protección externa (óxido-metal) que disminuye el impacto adverso ambiental contra agentes corrosivos externos, como el

oxígeno y la humedad. La capa de óxido resultante, generalmente de carácter inerte, ayuda a preservar la integridad estructural del metal y prolonga su vida útil [15]. De igual manera ocurre con el pavonado, solo que en este proceso buscaremos formar, normalmente, una capa de magnetita (Fe_3O_4), en lugar de una capa de óxido de hierro (Fe_2O_3).

Existen diferentes métodos de recubrimiento por pasivación (ver Figura 1-3), cada uno con sus propias características y aplicaciones. Estos, en general, implican diferentes procesos para su obtención, químicos o electroquímicos, se aplican sobre diferentes metales, tienen resultados estéticos distintos y las propiedades mecánicas que aportan son distintas. Sin embargo, el objetivo común es conseguir mejorar la durabilidad, prolongar la vida útil y prevenir o retrasar la corrosión [16].

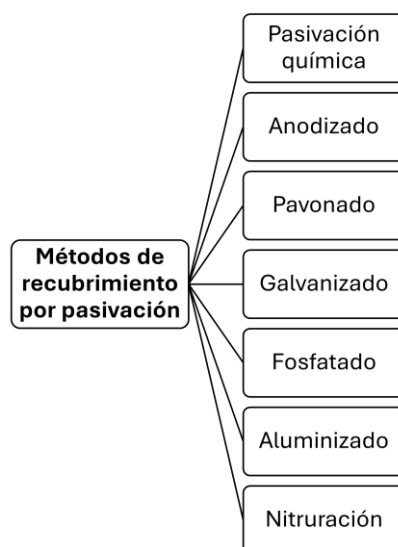


Figura 1-3. Métodos de recubrimiento por pasivación (elaboración propia)

1.1.5 El pavonado

En la ingeniería mecánica, el pavonado es un proceso de tratamiento por pasivado que se aplica en metales ferrosos en las industrias metalúrgicas, armamentísticas o automovilística para mejorar las propiedades estéticas para conseguir que sean más atractivas y de protección contra la corrosión.

Consiste en aprovechar la oxidación, que es la formación de películas de óxido en la superficie del metal, se utilizan ampliamente para proteger los productos contra la corrosión y darles una apariencia más atractiva (ver Figura 1-4). La oxidación del metal se lleva a cabo de varias maneras: químicamente, térmicamente, electroquímicamente, mediante llama o arco [17]. Cada uno de estos métodos tiene ventajas y desventajas en cuanto a tecnología del proceso de oxidación, equipo utilizado y accesorios. Particularmente, en el método de pasivación por pavonado lo que se busca es la formación de una capa de natural de magnetita (Fe_3O_4), formada a partir de óxido de hierro (Fe_2O_3).



Figura 1-4. Resultados del proceso de pavonado en el cierre de un arma corta (tomada de [18])

1.1.5.1 La magnetita

El pavonado en la mayoría de los casos se consigue por conversión formado por una reacción química con el hierro en el metal para crear una superficie protectora integral. A diferencia de los recubrimientos aplicados que se adhieren al metal sin una reacción química, el pavonado se logra cuando una mezcla de sustancias cáusticas, oxidantes y aditivos reacciona con el hierro para formar magnetita (Fe_3O_4), el óxido negro del hierro [19]. Esta capa de magnetita no dispondrá de propiedades magnéticas, ya que la ausencia de un campo magnético externo durante su proceso de formación impide la alineación de los momentos dipolares de los dominios magnéticos que podrían inducir un campo magnético natural.

La formación de una capa de magnetita ocurre cuando un componente se sumerge en una solución alcalina de sal a temperaturas entre 130 y 150°C a partir de la descomposición del óxido de hierro [20]. Este proceso implica varios pasos de inmersión, como limpieza de la superficie, precalentamiento, aplicación de la capa de magnetita, enjuague, secado y sellado. La característica distintiva de este recubrimiento es que la magnetita se integra químicamente con el acero durante la conversión [21].

Los diagramas de Pourbaix, también conocidos como diagramas de potencial-pH se utilizan para ayudar en la predicción de los estados más estables de un metal, sus productos de corrosión, y sus iones asociados en una solución acuosa [22]. El diagrama de Pourbaix que se puede ver en la Figura 1-5, muestra las regiones de estabilidad en soluciones acuosas para el hierro, iones ferrosos y férricos, oxihidróxidos (FeOOH) y magnetita [23].

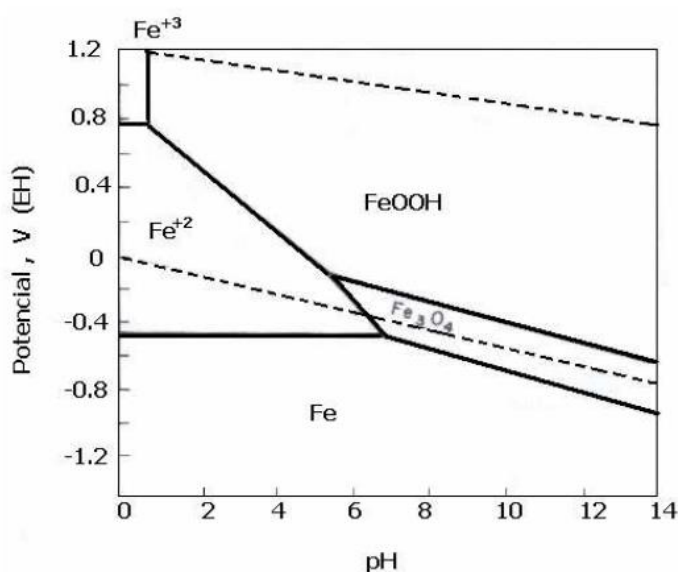


Figura 1-5. Diagrama de Pourbaix Fe-H₂O (tomada de [24])

1.1.5.2 Ventajas y desventajas

Los recubrimientos de pavonado, especialmente los producidos mediante un proceso caliente convencional (a 140°C), generan una verdadera magnetita de hierro de pavonado. Se conservan los beneficios del pavonado, incluyendo la estabilidad dimensional, dureza, retención de temple y propiedades superficiales. Las superficies pulidas mantienen su brillo, mientras que los acabados mates conservan su apariencia mate. Es importante destacar que el pavonado no se descascara, pela, desprende ni se frota. Además, frente a otros métodos por pasivación como el galvanizado o el anodizado, el pavonado tiene como ventajas [25]:

- Proceso económico, lo que lo hace idóneo para su implementación en los buques de la Armada pues no es necesario emplear gran cantidad de recursos.
- Proceso que se puede realizar a baja temperatura, puede ser beneficioso para metales sensibles al calor.
- Proceso que ofrece un aspecto estético atractivo, proporcionando un acabado oscuro o negro
- Proceso sencillo, puede llevarse a cabo en entornos con espacio reducido como es el caso del taller de un buque de guerra.
- No añade micras extra de volumen a la pieza, lo que lo convierte en apropiado para piezas que requieran precisión mecánica, a diferencia de otros métodos de protección como el niquelado, el galvanizado o el pintado.

Por otra parte, no es el método más eficaz de protección contra la oxidación. Por ejemplo, no es el método más indicado para piezas expuestas a una continua intemperie, pero para interiores o piezas que estén continuamente engrasadas, es uno de los recubrimientos con aspecto más bonito que hay, y puede durar bastantes años, según el mantenimiento que se le aplique. Y en todo caso, sin protección alguna, debería aguantar un mínimo de 24 horas antes de que empiecen a aparecer signos de corrosión a temperatura ambiente [26].

1.1.5.3 Métodos de pavonado

El recubrimiento de pavonado puede formarse tanto en una solución caliente como en una fría. El proceso de pavonado "frío", aplicado a temperatura ambiente o ligeramente elevada, produce depósitos blandos con una resistencia a la corrosión y abrasión inferior en comparación con el proceso "caliente". Los pavonados fríos a menudo muestran variaciones de color en la misma pieza o de una pieza a otra y no cumplen con las especificaciones automotrices o militares para recubrimientos de pavonado [27].

Tipos de pavonado	
Pavonado en caliente	Pavonado en frío
Los dos métodos más comunes de pavonado en caliente son el clásico en aceite y el químico alcalino. El pavonado en caliente, por calor o en aceite es un método tradicional en la industria para dar un acabado protector a piezas pequeñas de acero como pasadores, tornillos y clavos. Este proceso implica calentar las piezas a una temperatura entre 200 °C y 400 °C y luego sumergirlas en aceite. El color final del pavonado varía según la temperatura y la composición del metal, pero	Los dos métodos más comunes de pavonado en frío son el método de "óxido rojo" y el pavonado en frío con un ácido comercial específico. El pavonado por "óxido rojo implica alterar la superficie del acero mediante una reacción química controlada que forma una capa de óxido en toda la superficie de contacto, que posteriormente se convertirá en magnetita al absorber calor. Los agentes químicos comúnmente utilizados incluyen hidróxido de sodio (NaOH), nitrato de sodio (NaNO ₃) y nitrato de potasio (KNO ₃), que se mezclan con agua y se

generalmente resulta en un tono azulado profundo. El pavonado químico alcalino consiste en forzar la reacción necesaria a partir de una solución alcalina y calor. Es el método habitualmente utilizado en el acabado de armas cortas y largas.	calientan a alrededor de 100 °C. Esta reacción es exotérmica, lo que significa que libera calor en el agua y aumenta su punto de ebullición hasta aproximadamente 140 °C. El pavonado en frío con ácido comercial implica el uso de ácidos específicamente preparados y que producen sobre la capa de acero la reacción de formación de magnetita deseada.
Métodos comunes	
• Pavonado clásico en aceite • Pavonado químico alcalino	• Pavonado en frío con ácido preparado • Pavonado en óxido rojo

Tabla 1-3. Métodos de pavonado (elaboración propia)

1.2 Objetivos y metodología

El objetivo principal es evaluar la viabilidad y la efectividad de distintos métodos de pavonado como medios de protección contra la corrosión en componentes metálicos de los buques de la Armada, con el fin de mejorar la durabilidad, el rendimiento y la capacidad operativa de la flota naval.

Este objetivo busca abordar la necesidad de preservar la integridad funcional y operativa de los buques de la Armada y sus mecanismos, considerando el ambiente marino altamente corrosivo al que están expuestos. Se busca identificar un método de pavonado que no solo ofrezca una protección duradera contra la corrosión, sino que también sea práctico y factible de implementar en los talleres de los buques, contribuyendo así a mantener la capacidad operativa y la eficiencia de la flota naval en condiciones adversas. De estos se derivan otros objetivos complementarios:

- Identificar los diferentes métodos de pavonado disponibles, comprender sus características y aplicabilidad en la protección contra la corrosión.
- Someter muestras de acero de clase “normal” con contenido de carbono inferior al 1%, utilizado en la construcción naval, para someterlas a los distintos métodos de pavonado.
- Aplicar los métodos de pavonado sobre las muestras. Evaluar la calidad y uniformidad de los recubrimientos formados, así como su adherencia a la superficie.
- Someter las muestras de acero pavonadas a pruebas de resistencia a la corrosión en entornos de estrés y comparar los resultados obtenidos para determinar la eficacia de cada método de pavonado.
- Analizar los resultados de pruebas de resistencia a la corrosión. Concluir sobre la idoneidad y las limitaciones de cada método de pavonado en la protección contra la corrosión de componentes de acero, así como su viabilidad de implementación en los talleres de los buques de la Armada.

1.3 Estructura de la memoria

Habiendo definido cuáles son los objetivos y motivación del presente trabajo y conociendo el contexto en el que se desarrolla, definiremos la estructura que se seguirá en sus diferentes apartados:

- **Capítulo 1: Introducción y objetivos.** Apartado actual con información general del proyecto.
- **Capítulo 2: Estado del arte.** Revisión bibliográfica para contextualizar el trabajo y aportar información para su posterior desarrollo
- **Capítulo 3: Desarrollo del TFG.** Descripción de los métodos y tareas realizadas.
- **Capítulo 4: Resultados.** Análisis de las propiedades de los distintos procesos
- **Capítulo 5: Conclusiones y líneas futuras.** Posibilidades de optimización y proyectos adicionales que puedan utilizar este trabajo como punto de partida.

Además de esta segmentación, se incorporan Anexos que amplían y los fundamentos expuestos a lo largo del documento, destacándose especialmente los dos primeros por su relevancia específica:

- **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.
- **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.
- **Anexo III: Resumen de los métodos de pavonado.** Tabla resumen con los pasos necesarios para la realización de los diferentes métodos de pavonado aplicados en este proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 El acero

Una amplia gama de mezclas de metales, incluyendo aceros con diferente contenido de carbono, aceros con aleaciones diversas, aceros inoxidable, hierro fundido y mezclas de cobre, son utilizadas en la fabricación de una variedad de engranajes. Por ejemplo, los engranajes de transmisión para automóviles se fabrican con acero al cromo, mientras que los de turbinas de gas para aviones y barcos se hacen con acero al cromo-molibdeno. Para equipos de excavación o movimiento de tierra, se emplean aceros al níquel-molibdeno, y ciertas mezclas de cobre se utilizan en la fabricación de engranajes para cargas más ligeras [28].

Los metales y sus combinaciones tienen numerosas propiedades valiosas en ingeniería, lo que ha llevado a su amplia aplicación en diseños de este ámbito. El hierro y sus aleaciones, especialmente el acero, representan aproximadamente el 90% de la producción mundial de metales [29], principalmente debido a su favorable combinación de resistencia, tenacidad y ductilidad a un costo relativamente bajo, ver Tabla 2-1 [30].

Precio de principales metales (€/kg)	
Acero	1,00
Aluminio	2,50
Cobre	7,00
Plata	700
Litio	15,0
Estaño	20,0

**Tabla 2-1. Precio de los principales metales del mercado
(elaboración propia)**

2.1.1 Fabricación del acero

Los aceros al carbono son esencialmente mezclas de hierro y carbono que contienen aproximadamente hasta un 1,2% de carbono. No obstante, la mayoría de los aceros se producen al reducir el contenido de carbono y otras impurezas presentes en el arrabio.

El método más común para convertir el arrabio en acero es el proceso básico de oxígeno. En este proceso, el arrabio se introduce junto con hasta un 30% de chatarra de acero en un convertidor revestido con material refractario, con forma de barril, dentro del cual se inserta una lanza de oxígeno. El oxígeno puro suministrado por la lanza reacciona con el baño de metal fundido para formar óxido de hierro. Posteriormente, el carbono presente en el acero reacciona con el óxido de hierro, produciendo monóxido de carbono.



Inmediatamente antes que comience la reacción del oxígeno se agregan cantidades controladas de fundentes (principalmente cal) que forman escoria. En este proceso, el contenido de carbono del acero se puede reducir de manera rápida en casi 22 minutos, al tiempo que se reduce la concentración de impurezas como azufre y fósforo.

En las aleaciones de hierro y carbono, se producirán una serie de fases en función de la temperatura de solidificación y del porcentaje de carbono de la mezcla (ver Figura 2-1), que le proporcionarán unas características u otras al material final. En consecuencia, tendremos diferentes prestaciones según el uso que se le quiera dar desde el punto de vista mecánico [31].

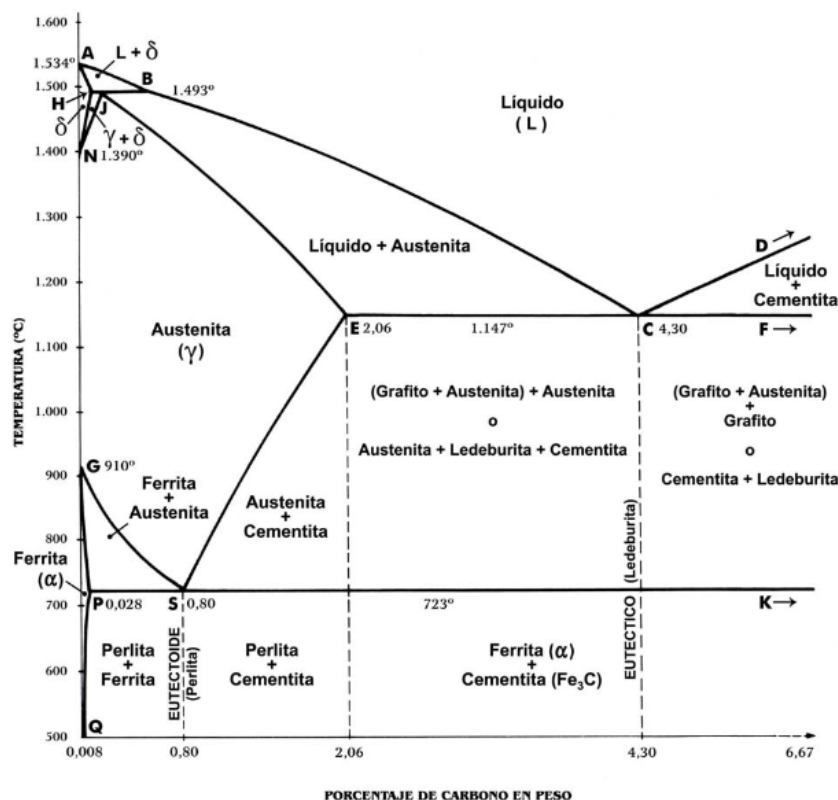


Figura 2-1. Diagrama de equilibrio del sistema Fe-C (tomada de [31])

2.1.2 Acero en la construcción naval

En la industria naval, se prefiere el uso de aceros con un contenido de carbono bajo, generalmente no superando el 0,21%. Esto se debe a que las láminas de acero utilizadas en los cascos de los barcos necesitan ser duras, pero también lo suficientemente flexibles para adoptar formas redondeadas e hidrodinámicas. Por lo tanto, la mayoría de los aceros utilizados en la construcción naval son hipoeutectoides [32].

Los aceros hipoeutectoides son aquellos que tienen un contenido de carbono inferior al 0,77%. Cuando se enfrían lentamente, su microestructura resultante es una combinación de perlita y hierro- α . El hierro- α es una fase en la que la disposición de los átomos de hierro es cúbica centrada en el cuerpo, y los átomos de carbono se ubican en los espacios intersticiales. La cantidad de átomos de carbono es muy pequeña, lo que resulta en un material que mantiene su dureza, pero también es dúctil y magnético [32].

Por otro lado, cuando el contenido de carbono supera el 0,77%, obtenemos aceros hipereutectoides. En estos aceros, las fases predominantes son la perlita y la cementita (Fe_3C). Aunque estos aceros son duros, son difíciles de mecanizar [32].

2.2 Oxidación del acero

La oxidación, en su sentido estricto, es la reacción del metal con el oxígeno, y es el proceso corrosivo más importante de los metales a elevadas temperaturas; el producto de la reacción es un óxido o una mezcla de óxidos. La reacción de un metal con otros gases agresivos da lugar a la formación de compuestos con estados oxidados del metal, como sulfuros, carbonatos, etc. De cualquier manera, el hecho importante de la oxidación es la pérdida de metal, que puede conducir a fallos de importancia en cualquier dispositivo o estructura.

En los materiales metálicos, el proceso de corrosión es normalmente electroquímico; es decir, una reacción química en la cual hay una transferencia de electrones de una especie a otra. Una característica de los átomos metálicos es la pérdida o ganancia de electrones durante la oxidación. Por ejemplo, un metal M, que tiene una valencia n (o n electrones de valencia) puede experimentar oxidación según la siguiente reacción



Donde M se convierte en un ion con $n+$ cargas positivas al perder sus n electrones de valencia. Se utiliza e^- para simbolizar un electrón. En el caso de la oxidación del hierro:



La oxidación es un fenómeno espontáneo en prácticamente todos los metales en presencia de oxígeno en el que hay que tener en cuenta dos aspectos: la fuerza impulsora para que la corrosión se produzca, y su cinética, que indica la velocidad a la que el proceso corrosivo efectivamente se produce. Este último concepto es de vital importancia tecnológica, porque permite conocer en cuánto tiempo el material sufre una degradación inaceptable.

Además, la oxidación del acero a altas temperaturas es muy importante en el diseño de ingeniería de turbinas de gas, motores de cohetes y equipo petroquímico de altas temperaturas.

2.2.1 Concienciación en la armada

En la D-CP-10, que es una publicación en vigor titulada “Manual doctrinal de energía y propulsión” [33], en el capítulo 4, se establecen las precauciones de seguridad que han de llevarse a cabo durante la entrada y salida de dique.

Una de las precauciones está relacionada con la corrosión y contra las medidas de prevención de la misma. Se establecen así, intervalos de tiempo para limpieza y pintado de la obra viva del buque en función del estado de corrosión del buque y de las evaluaciones de inspecciones submarinas realizadas.

En la D-CP-01, otra publicación en vigor titulada “Manual doctrinal de seguridad interior a bordo” [34], se define la corrosión como una de las principales causas que pueden contribuir a la pérdida de estanqueidad. Se tiene en cuenta que el medio marítimo contribuye a la rápida oxidación de los elementos y estructuras, provocando no solo pérdidas en la resistencia estructural del elemento o superficie, sino que también afecta a la integridad estanca en los mismos. Además, no es necesario que el metal esté completamente oxidado, ya que pueden aparecer zonas cuya resistencia estructural se vea debilitada, y no sean capaces de resistir las presiones hidrostáticas ejercidas por el paso de fluidos a presión, inundaciones, etc.

Por todo lo expuesto anteriormente, evitar la oxidación es de vital importancia para el mantenimiento de la integridad estanca del buque. En consecuencia, algunas de las medidas adoptadas en la Armada es la utilización de pinturas, materiales higroscópicos e inspecciones periódicas realizadas por los Cabos 1º de Seguridad Interior de los destinos, cuya función es la de informar, entre otras cosas, del estado de elementos estructurales de dichas zonas, tales como mamparos, cubiertas, techos, cuadernas, materiales o cualquier elemento que pudiera presentar oxidaciones.

2.3 Métodos de protección contra la oxidación

Existen diversas técnicas disponibles para prevenir, retardar o manejar la corrosión. Desde una perspectiva formal, estas técnicas pueden clasificarse en métodos activos y pasivos [35]. La corrosión representa el principal agente de deterioro para las estructuras metálicas que se encuentran bajo el agua o enterradas bajo tierra. La solución más eficaz para este problema implica la aplicación de pintura junto con la instalación de ánodos de sacrificio o sistemas de protección catódica mediante corriente impresa (ICCP) [36].

Anteriormente, hemos visto la importancia de buscar métodos de protección contra la oxidación debido al impacto económico que suponen anualmente para los países (Tabla 1-2). Además, otro de los graves impactos que produce la oxidación, se traduce en que se siguen registrando lesiones, muertes y efectos ambientales negativos por el deterioro de tanques de presión, en componentes o elementos estructurales de atracciones, aeronaves o buques [37].

En los laboratorios y en las instalaciones industriales, se busca evitar que ocurra la oxidación a altas temperaturas creando condiciones que impidan el proceso desde un punto de vista termodinámico (controlando la tendencia). Por otro lado, en situaciones de servicio, la estrategia principal para reducir el deterioro es seleccionar adecuadamente el material del componente o aplicar un recubrimiento específico. Esto se hace para controlar la velocidad a la que ocurre la oxidación dentro de límites aceptables. Muchas recomendaciones sobre la selección de materiales para condiciones ambientales agresivas y poco conocidas a altas temperaturas se derivan de la experimentación. La mayoría de las aleaciones que resisten la oxidación en el aire contienen cromo, silicio y aluminio, entre otros elementos de aleación. Estos elementos forman rápidamente una capa de óxido protectora y estable que actúa como una barrera efectiva contra iones y electrones.

El tipo de película de óxido determina la proporción a la cual ocurre la oxidación. Para la reacción de oxidación del hierro, como se puede ver en la ecuación 2.4, se tendría:



La relación de Pilling-Bedworth (P-B) es:

$$\text{Relación PB} = \frac{\text{volumen de óxido por átomo de metal}}{\text{volumen de metal por átomo}} = \frac{(M_{\text{óxido}})(\rho_{\text{metal}})}{n(M_{\text{óxido}})(\rho_{\text{metal}})} \quad (2.5)$$

Donde M es la masa atómica o molecular, ρ la densidad y n es el número de átomos de metal en el óxido, según queda definido en la ecuación 2.5.

Si la relación de Pilling-Bedworth es menor que uno, el óxido ocupa un volumen menor que el metal a partir del cual se formó; por tanto, el recubrimiento es poroso y la oxidación continúa con rapidez, lo cual es típico de metales como el magnesio. Si la relación es de uno a dos, los volúmenes de óxido y de metal son similares, formándose una película protectora adherente no porosa, lo cual es típico en el aluminio y el titanio. Si la relación excede de dos, el óxido ocupa un gran volumen y se desprende de la superficie, exponiendo el metal fresco que se continúa oxidando, lo que es típico en el hierro. Aunque la ecuación de Pilling-Bedworth históricamente ha sido utilizada para caracterizar el comportamiento de los óxidos, se observan muchas excepciones a dicho comportamiento [38].

2.3.1 Métodos de protección actuales

Como se ha discutido, el pavonado es un método de protección por pasivación consistente en la formación de una capa superficial de magnetita (inoxidable) que aporta protección al resto de la pieza. Sin embargo, existen otros métodos de recubrimiento que ofrecen características y beneficios únicos.

Una diferencia entre el pavonado y otros métodos de recubrimiento, que se emplean en la actualidad, radica en los materiales utilizados y el proceso de aplicación. Por ejemplo, en el caso del galvanizado, se aprovecha la protección contra la corrosión que proporcionan el zinc y sus aleaciones. La capa de galvanizado sirve primero como recubrimiento de barrera para evitar que medios corrosivos como los iones de Cl^- penetren en el acero matriz. Esta acumulación de los productos de corrosión de zinc mejoraría aún más la acción de barrera de la capa de galvanizado. Además, la capa de galvanizado puede actuar como un ánodo sacrificado, donde el zinc se corroería preferentemente en comparación con el acero [39].

Por otro lado, el acero galvanizado por inmersión en caliente se ha utilizado ampliamente en una variedad de aplicaciones durante más de 100 años debido a su excelente durabilidad y resistencia a la corrosión. En los últimos años, ha habido una amplia investigación para mejorar su resistencia a la corrosión. Como alternativa, el acero aluminizado por inmersión en caliente se utiliza ampliamente, especialmente para materiales en partes de escape de automóviles, partes de construcción al aire libre y diversas partes de alta resistencia, debido a su superior resistencia a la corrosión en comparación con el acero galvanizado por inmersión en caliente y su atractiva superficie. La razón de la capacidad antioxidante mejorada del acero aluminizado es la formación de una capa protectora, densa y estable de Al_2O_3 en la superficie de la capa aluminizada en los aceros [40]. En todo caso, el método por galvanizado añade un cierto espesor adicional a la pieza. Este efecto puede ser despreciable en un alto número de piezas; pero tremendamente negativo en otras piezas para las que se requiere precisión mecánica; como los distintos mecanismos presentes en las armas de fuego.

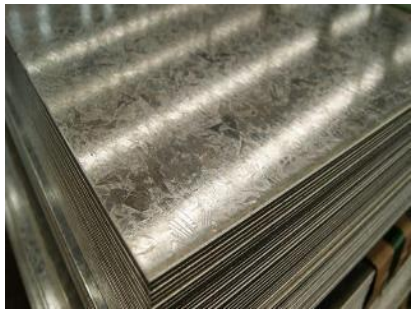
		
Acero galvanizado	Acero aluminizado	Acero pavonado

Tabla 2-2. Comparación entre acabados en acero (elaboración propia)

2.4 Pavonado

El pavonado, un método de recubrimiento ampliamente utilizado, ofrece una serie de ventajas que lo hacen atractivo en ciertos contextos, a pesar de no ser el más eficaz en términos de protección contra la oxidación. A diferencia de otros métodos como el galvanizado o el anodizado, el pavonado destaca por su economía, su realización a baja temperatura y su sencillez, lo que lo convierte en una opción viable para aplicaciones específicas, como en los buques de la Armada donde los recursos pueden ser limitados y el espacio reducido. Además de su practicidad, el pavonado proporciona un acabado estético oscuro o negro, manteniendo la estabilidad dimensional y las propiedades superficiales del metal tratado. Aunque su resistencia a la corrosión puede ser limitada en ciertas condiciones, su durabilidad puede prolongarse con el adecuado mantenimiento, especialmente en ambientes interiores o en piezas continuamente engrasadas. En este sentido, el pavonado combina funcionalidad con un atractivo visual, ofreciendo una opción versátil para diversos usos industriales y marítimos.

2.4.1 Contexto histórico

El pavonado, un proceso antiguo empleado en la protección y mejora estética de armas, se evidencia en las armaduras medievales exhibidas en museos [41]. Junto a las brillantes armas bruñidas, se encuentran otras ennegrecidas por métodos como la exposición al calor, grasas animales, azufres y oxidación por ácidos. Si bien se desconoce el año exacto en que se comenzó a utilizar esta técnica, se puede discernir que debió de comenzar en la Edad de Hierro. Se cree que la palabra pavón se deriva de su etimología que viene del latín “pavo” o “pavōnis”, esto debido al color azul negrizco que se asemeja al de las plumas del pavo real.

Hasta finales del siglo XVIII, las armas militares se pulían a espejo con polvos o pastas a base de carbón vegetal o arcillas, siendo el pavonado un secreto bien guardado en ese entonces. Se especula que el deslumbrante brillo de las armas al sol, durante batallas o la caza, que desvelaba la posición del combatiente, pudo haber incentivado la adopción del pavonado.

Los primeros pavonados probablemente fueron los bronceados, una forma de oxidación lenta que resulta en un tono amarronado. Con el tiempo, se perfeccionó este proceso, incluyendo tratamientos adicionales como escaldados o hervidos al vapor para lograr un color más oscuro. En los arsenales británicos del siglo XVIII se desarrolló el pavonado achocolatado, característico de fusiles como el “Brown Bess” (ver Figura 2-2). Se empleaba la “mantequilla de antimonio”, una mezcla de tricloruro de antimonio con aceites que se aplicaba a las superficies pulidas durante varios días, generando un oxidado marrón distintivo.



Figura 2-2. Fusil británico, Brown Bess, utilizado en 1722 (tomada de [42])

En la Real Armería Española, se encontraban, durante los reinados de Carlos V, Felipe II y Carlos II, diferentes armas y piezas con decoraciones realizadas mediante técnicas destinadas a mostrar o realzar su belleza y riqueza, gracias a superficies grabadas al agua fuerte, leves repujados, superficies doradas o plateadas y pavonados [43]. Ejemplo de lo anterior son la Figura 2-3 y Figura 2-4 a continuación:



Figura 2-3. Pareja de pistolas decoradas empleando el pavonado (tomada de [44]).



Figura 2-4. Armadura de acero pavonado, de Felipe III niño. (tomada de [45]).

La fórmula del pavonado publicada en la Real Orden de 8 de marzo de 1854, que se empleaba en las armas de la Fábrica de Toledo [46], implicaba el uso de ácido nítrico diluido en agua, aplicado en intervalos con cepillado y limpieza entre cada tratamiento.

En cuanto al acabado mate de las armas antiguas, se sugiere que pudo ser resultado de un ennegrecimiento de armas previamente bruñidas, en lugar de un intento deliberado de matizarlas. Se contrasta este método con los acabados mate modernos, como el parkerizado o fosfatado, que utilizan ácido fosfórico saturado con limaduras de hierro para proteger el metal.

2.4.2 El pavonado en la actualidad

2.4.2.1 Sector empresarial

El pavonado sigue siendo una parte integral de numerosos procesos industriales en la actualidad. Aunque se carece de documentación pública debido a la complejidad de su cálculo, en Madrid, en Temples Industriales Alcalá [47], por ejemplo, la producción promedio diaria alcanza alrededor de 400 kg de piezas variadas. Estas pueden ir desde tornillería diminuta hasta impresionantes componentes como un aro para Airbus, con dimensiones de 2.5 metros de diámetro y un peso que roza los 700 kg.

La versatilidad del pavonado radica en su capacidad para preservar las dimensiones originales de las piezas, ya que no añade capas adicionales. Además, cuando se protege adecuadamente de la humedad, su resistencia a la corrosión, en combinación con la aplicación de grasa, es notablemente alta, lo que lo convierte en un proceso rentable y práctico.

Por otra parte, desde Tratamientos Térmicos Díaz Maroto [48], afirmar que el pavonado destaca entre otros métodos anticorrosivos debido a su mínima generación de sobremedida en la capa de óxido, lo que lo convierte en una opción preferida para piezas terminadas. Sin embargo, reseñan que su eficacia en la protección contra la corrosión es moderada. Este proceso encuentra su aplicación en piezas destinadas a entornos interiores y libres de humedad o agresiones ambientales.

Así mismo, comentan que es esencial mantener una capa de grasa anticorrosiva después del tratamiento para maximizar su efectividad. Aunque la inversión inicial puede no ser significativa, varía

según el uso industrial o para aplicaciones más pequeñas. Se debe tener en cuenta que el consumo energético es considerable, ya que mantener la temperatura de proceso alrededor de los 145°C requiere un suministro de calor constante, junto con la reposición del líquido debido a su evaporación continua. Además, se hace imprescindible contar con un sistema de aspiración para los vapores generados durante el proceso. En la siguiente Figura 2-5, proporcionada por Tratamientos Térmicos Días Maroto, se puede ver como es el resultado de este proceso en la actualidad:



Figura 2-5. Tornillo de presión de apoyo pavonado para su comercialización (proporcionada por [48])

2.4.2.2 Restauración de piezas y armas oxidadas

El pavonado, una técnica fundamental en la restauración de armas y piezas oxidadas, plantea a los aficionados un dilema que va más allá de la mera eliminación del óxido. Al enfrentarse a armas antiguas u otras antigüedades de acero que presentan un acabado pavonado, surge la pregunta de cómo abordar su restauración (ver Figura 2-6). Esta elección depende de diversos factores, como el estado de deterioro de las piezas, su valor histórico o sentimental, el uso que se les vaya a dar y, por supuesto, los gustos personales del restaurador.



Figura 2-6. Carabina Huracán oxidada (tomada de [49])

Uno de estos restauradores [49] afirma que, entre las opciones disponibles, el repavonado emerge como una alternativa destacada, con distintas modalidades según las necesidades y preferencias del restaurador. Desde el repavonado en frío (ver Figura 2-7), adecuado para piezas de poco valor o de dimensiones reducidas, hasta el repavonado en caliente mediante técnicas como el baño de sales, especialmente indicado para restauraciones más completas o para piezas que se deseen devolver a su estado original.



Figura 2-7. Misma Carabina Huracán restaurada utilizando pavonado (tomada de [49])

Sin embargo, considera que conservar el pavón existente puede ser una prioridad para algunos restauradores, quienes desean mantener el brillo que el tiempo ha conferido a las piezas [50]. A menudo, se recurre a métodos menos invasivos, como la eliminación cuidadosa del óxido con lana de acero embebida en aceite, aunque esto puede resultar difícil sin afectar la intensidad del pavón en las zonas adyacentes.

Tomando inspiración de diversas fuentes [51] [52] [53], algunos restauradores han desarrollado técnicas particulares para preservar el brillo original mientras se detiene el proceso de oxidación y se restauran los daños superficiales. Estos métodos pueden implicar un hervido inicial seguido de un pulido delicado para eliminar el óxido desleído, seguido de la aplicación de aceite para asegurar la durabilidad del pavón.

2.4.2.3 Armada

En el ámbito de la Armada, para saber cómo se aplica el pavonado en las armas, se pregunta sobre su mantenimiento a bordo del Juan Sebastián de Elcano a el suboficial responsable de artillería, con una amplia experiencia en diferentes unidades. Proporcionó detalles sobre el proceso meticuloso que siguen para garantizar el óptimo funcionamiento de éstas. Se explicó que, como primer escalón de mantenimiento, se aplica un pavonado en frío a todas las armas. Tras cada uso, se realiza una limpieza exhaustiva seguida de la aplicación de una fina capa de aceite especial para armas, que protege contra la oxidación y lubrica las piezas para su próximo uso. Se enfatizó la importancia de aplicar esta capa de manera precisa para evitar la emisión de humo blanco y la acumulación de residuos no deseados en el interior del arma.

Se destacó la relevancia de este proceso para el armamento portátil, que se almacena en pañoles y armerías, lo que lo hace menos vulnerable a las inclemencias del tiempo en comparación con los montajes de artillería, expuestos en las cubiertas de los buques. Para estos montajes más grandes, se realiza un proceso de limpieza y mantenimiento más exhaustivo debido al mayor calibre de los disparos y la consiguiente acumulación de residuos de pólvora.

Después de la limpieza, se aplican grasa en las áreas con movimiento de piezas y aceite en el resto para proteger contra la oxidación. Se señaló que, aunque se lleva a cabo un mantenimiento riguroso a bordo, no cuentan con la capacidad ni los recursos para llevar a cabo pavonados en caliente u otros tratamientos avanzados. Sin embargo, se resaltó que las armas que reciben ya vienen con un pavonado óptimo y están listas para su uso.

La durabilidad y el rendimiento de estas armas, como las MG 42, se presentan como un testimonio de la calidad de los procesos de mantenimiento y la importancia de su correcta aplicación para garantizar su eficacia y longevidad en el mar.

2.5 Trayectoria del pavonado

El pavonado, un proceso antiguo de conversión química que forma una capa protectora de óxido sobre superficies metálicas, sigue siendo relevante en la actualidad debido a su eficacia contra la corrosión. La magnetita, un subproducto clave de este proceso, sigue siendo objeto de investigación con el objetivo de mejorar aún más sus propiedades contra la corrosión y, encontrar nuevas aplicaciones en la industria. En este contexto, se están llevando a cabo estudios para comprender mejor los mecanismos de formación de la magnetita y desarrollar técnicas innovadoras a partir del pavonado que mejoren su efectividad y aplicabilidad en diferentes áreas industriales.

En un estudio, “Evaluación de la resistencia a la corrosión de recubrimientos de doble capa de nano ferrita de níquel y magnetita sobre acero al carbono” [54], la magnetita (Fe_3O_4) desempeña un papel fundamental como uno de los productos de corrosión principales que se forman en la superficie del acero al carbono en el sistema de transporte de calor primario de los Reactores de Agua Pesada Presurizada (RAPP). La presencia de magnetita en la superficie del acero al carbono puede contribuir a la protección contra la corrosión al formar una película protectora en la interfaz metal/solución. Además, la magnetita actúa como sustrato para la deposición de ferrita de níquel (NiFe_2O_4) en este estudio. Este recubrimiento de ferrita de níquel sobre la magnetita permite la evaluación de su eficacia en la protección contra la corrosión y mejora de las propiedades de los materiales estructurales en el sistema de RAPP.

En otro estudio de Indonesia, “Aplicación de Magnetita Recubierta con Sílice en una Placa de Acero y su Efecto Friccional y Térmico” [55], se evalúa el uso de partículas de magnetita recubiertas con sílice como aditivo en lubricantes. Se analizan sus efectos en las propiedades térmicas del ferro-lubricante y en la reducción de la fricción en una placa de acero. Los resultados muestran que este aditivo mejora la conductividad térmica, el calor específico y reduce el coeficiente de fricción estática y dinámica. Además, se observa una mejora en la resistencia al desgaste de la placa. Estos hallazgos sugieren una aplicación prometedora de las partículas de magnetita recubiertas con sílice para mejorar la lubricación y la resistencia al desgaste en aplicaciones industriales.

Además, en el estudio de Nafeesa J.Khadim, “Comportamiento Anticorrosivo de Magnetita Deposita en Acero Galvanizado en Agua Salina Utilizando Pulverización por RF-Magnetron [56]” se describe un experimento en el que se aplicaron películas delgadas de magnetita sobre una aleación de acero galvanizado utilizando una técnica de pulverización catódica reactiva de RF (ver Figura 2-8). El objetivo era evaluar la eficacia de estas películas en la protección contra la corrosión del acero galvanizado. Se realizaron pruebas electroquímicas utilizando una celda de tres electrodos en una solución salina (NaCl al 3.5 %) a diferentes temperaturas (298, 308, 318 y 328K). Se utilizaron técnicas como la Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) para analizar la resistencia a la corrosión. Los resultados mostraron que, si bien la tasa de corrosión del acero galvanizado aumentó con la temperatura, la deposición de magnetita mejoró significativamente la eficiencia de protección, alcanzando un 79.76% a 318K.

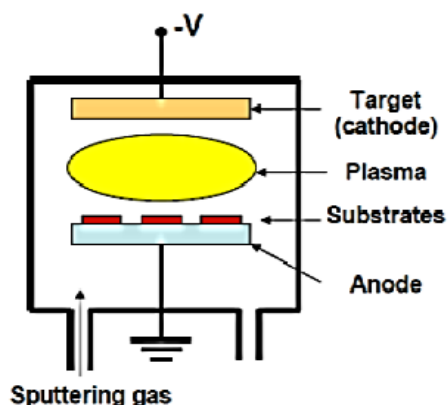


Figura 2-8. Ilustración del proceso de pulverización catódica (tomada de [56])

Otros estudios, se centran en el impacto de la oxidación en barras de acero pavonadas usadas en hormigón armado. En el caso de estudio, se simula un entorno marino de alto cloruro [57]. Se seleccionaron frecuencias específicas que correspondían a la resistencia de la solución y a la resistencia de transferencia de carga, lo que permitió mediciones más rápidas. Se prepararon un total de cinco muestras de mortero de cemento meticulosamente para la investigación. El estudio se centró en evaluar el impacto de las variaciones en la temperatura de pavonado en la minimización de la corrosión. El pavonado se llevó a cabo a 450, 550, 650 y 750 °C, y luego se sumergieron las muestras en una solución de NaCl al 3% en peso durante 21 días. Se realizaron pruebas frecuentes, justo después de la inmersión, a los 7, 14 y 21 días de inmersión. Se realizaron mediciones mediante impedancia de corriente alterna (AC) en un espectro de frecuencia que iba desde 100 kHz hasta 10 MHz. Los resultados mostraron una disminución significativa en la tasa de corrosión para las muestras pavonadas a 750 °C, lo que se atribuyó al desarrollo de capas protectoras más gruesas en las barras de refuerzo. Se observaron tasas de corrosión más altas para el pavonado a temperaturas más bajas.

3 DESARROLLO DEL TFG

Como se ha discutido en las secciones precedentes, el pavonado es un proceso fundamental en la industria para proteger las piezas de acero contra la corrosión y proporcionarles un acabado estético. Entre sus ventajas frente a otros métodos de protección destaca su bajo coste y la particularidad de que el pavonado no añade una capa de material extra a la superficie de la pieza, por lo que es adecuado para piezas en las que se requiere alta precisión de mecanizado. Existen varios métodos de pavonado, cada uno con sus propias ventajas y características distintivas. El pavonado en caliente, también conocido como pavonado por calor o en aceite, es un método tradicional que implica sumergir las piezas calentadas en aceite, lo que resulta en un tono azulado profundo y duradero. Por otro lado, el pavonado en frío o por reacción química es una opción más económica y sencilla, que implica una reacción química controlada para formar una capa de óxido en la superficie del acero. Este método ofrece una variedad de tonos y es efectivo para piezas pequeñas.

Cada método tiene sus propias características en términos de precio, efectividad y complejidad, lo que permite a los fabricantes elegir la opción más adecuada según sus necesidades específicas. En el marco de este trabajo, se desarrollaron los métodos de pavonado en frío con ácido comercial, en caliente con aceite, químico alcalino y en óxido rojo. Las piezas utilizadas son fragmentos de planchas de acero naval (clase normal, con contenido de carbono inferior al 1%) de aproximadamente 25 cm² superficie y 1 cm de espesor.

En resumen, como se puede comprobar en la Tabla 3-1, se pavonaron las siguientes piezas:

MÉTODOS PARA REALIZAR				
	1	2	3	4
	EN FRÍO CON ÁCIDO PREPARADO	CLÁSICO EN ACEITE	QUÍMICO ALCALINO	ÓXIDO ROJO
N.º PIEZAS	4	4	4	4

Tabla 3-1. Métodos de pavonado para realizar y número de piezas (elaboración propia)

Antes de comenzar con el desarrollo de los métodos, se incluye una tabla resumen en Anexo III: Resumen de los métodos de pavonado, con los diferentes pasos para realizar los distintos métodos de pavonado.

3.1 Método 1: Pavonado en frío con ácido comercial

Para este método se ha utilizado el producto “Ballistol ®” de Tifoo (ver Figura 3-1). El Ballistol Quick Browning es una solución de pavonado con brocha y puede ser utilizada para el pavonado de hierro y acero que contienen menos del 3% de cromo. Se puede aplicar en áreas de superficie más grandes y para la renovación de puntos dañados. Los campos de aplicación son el pavonado de armas, armamento y herramientas fabricadas en acero [58]. Este producto es sólo uno de los diversos ácidos comerciales que se ofrecen en el mercado específicamente para la realización del pavonado en frío. El uso de estos productos está extendido en el mantenimiento y la restauración de armamento.



Figura 3-1. Ácido comercial Ballistol® 50 mL (tomada de [59])

3.1.1 Material necesario

Para la realización de este método son necesarios los siguientes materiales:

- Preparado para pavonado o ácido comercial, en nuestro caso pavonador “Ballistol ®”
- Pistola de calor
- Pulidora
- Lija (tamaño de grano 400+800)
- Lana de acero 000 o equivalente
- Acetona/desengrasante (C_3H_6O)
- Alcohol Isopropílico (C_3H_8O)
- Aceite (tipo SAE90)
- Medios de protección personal (guantes)

3.1.2 Desarrollo del proceso

El proceso de pavonar en frío es una opción económica y efectiva si se realiza correctamente. Para este propósito, se utiliza el producto Ballistol® y se siguen una serie de pasos detallados a continuación.

En primer lugar, es fundamental desengrasar completamente el metal utilizando el desengrasante, en nuestro caso acetona (ver Figura 3-2), aunque este último puede ser tóxico y dañino para ciertos materiales. Luego, se procede a lijar el metal con una lija muy fina (400+800) o pulidora (ver Figura 3-3) para eliminar el pavonado antiguo y cualquier resto de óxido. El objetivo es dejar el metal completamente blanco, sin rastros de pavonado antiguo u óxido (ver Figura 3-4). Tras lijar se aplica nuevamente el desengrasante. Es crucial evitar tocar el metal con los dedos en este punto.



Figura 3-2. Acetona comercial utilizada como desengrasante de las piezas (elaboración propia)



Figura 3-3. Proceso de remoción de impurezas de la pieza de acero (elaboración propia)



Figura 3-4. Piezas de acero después del proceso de pulido y desengrasado (elaboración propia)

El siguiente paso implica empapar una brocha o pincel con el líquido pavonador Ballistol® y aplicarlo uniformemente sobre las piezas (ver Figura 3-5), evitando la contaminación con otras superficies. Una vez aplicado sobre toda la pieza, se acelerará el secado de ésta utilizando la pistola de calor (ver Figura 3-6). Una vez secada, será necesario remover los excedentes del óxido sobre la superficie de la pieza utilizando lana de acero (ver Figura 3-7), muy suavemente y empapada en isopropanol para cortar la reacción del ácido con el acero.



Figura 3-5. Pieza de acero tras la aplicación uniforme del ácido comercial (elaboración propia)

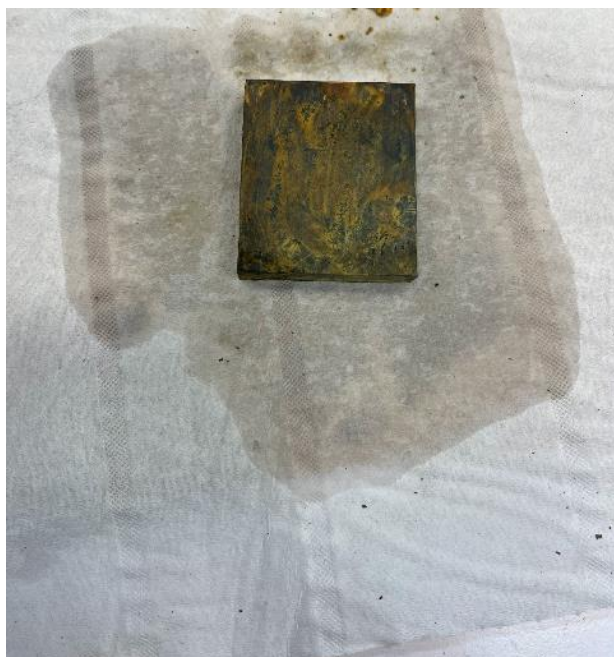


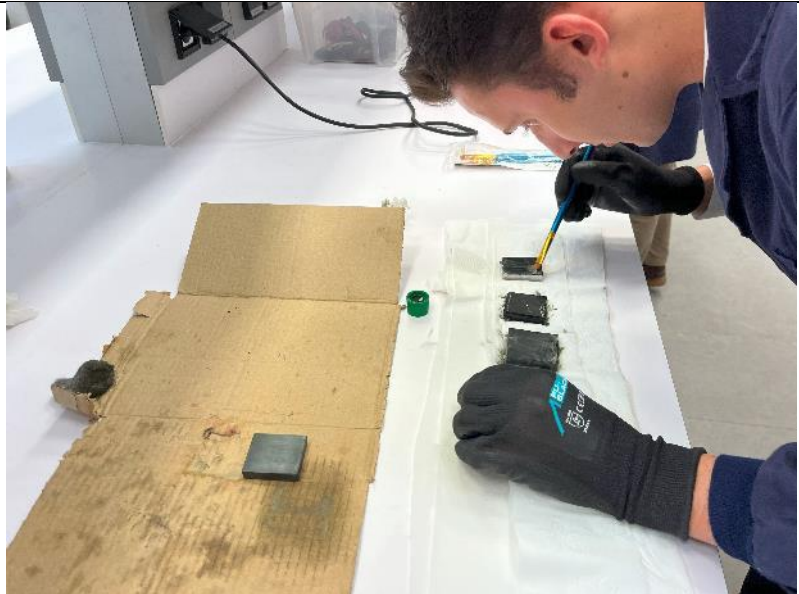
Figura 3-6. Pieza de acero tras secarla utilizando la pistola de calor (elaboración propia)



Figura 3-7. Pieza de acero, una vez removido todo el excedente de óxido (elaboración propia)

Para obtener un tono más oscuro, se repite el proceso, hasta seis veces, de aplicación del líquido pavonador, secado y remoción de excedentes, con isopropanol para cortar la reacción (ver Tabla 3-2). Es esencial lubricar el metal pavonado al finalizar y dejarlo reposar durante al menos 24 horas en aceite para que el pavonado se cure completamente.

**Proceso de aplicación del
ácido comercial en el
conjunto de las piezas de
acero**



**Proceso de secado de las
piezas tras la tercera
repetición. Se aprecia
como la capa de excedente
que se forma es cada vez
menor**



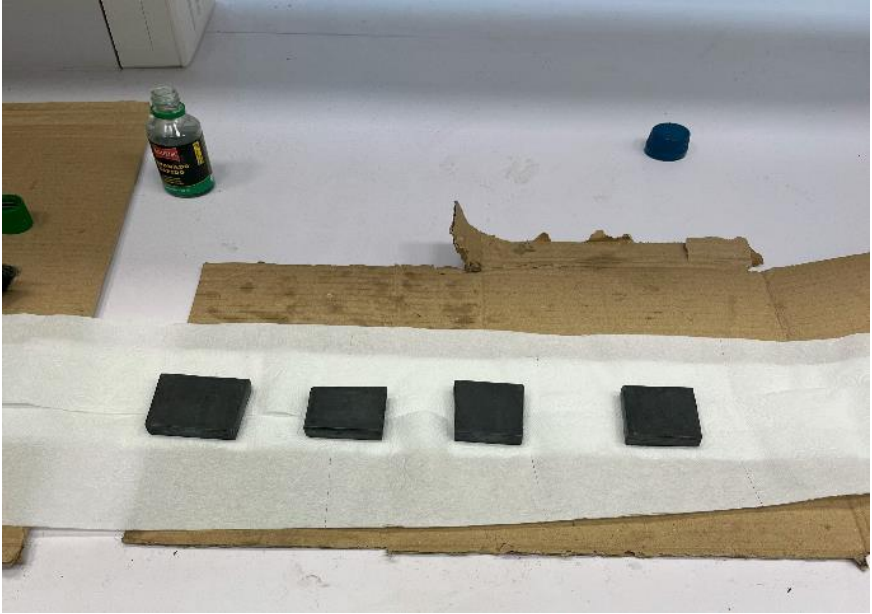
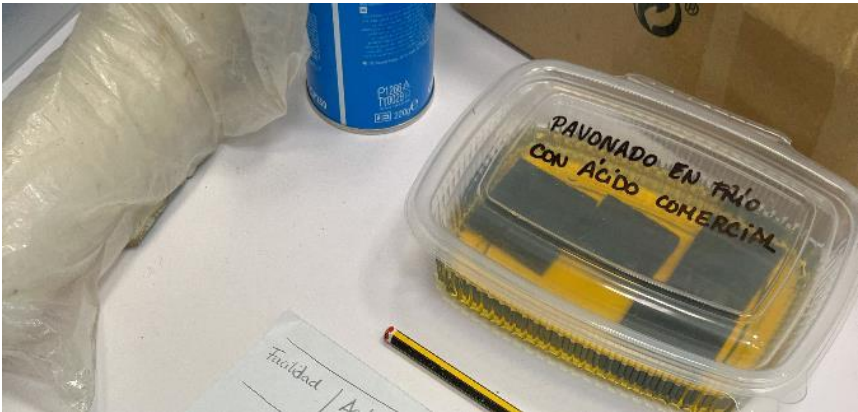
Resultados del pavonado tras la sexta pasada. Se aprecia un acabado estético negro uniforme	
Reposo de las piezas en aceite, mínimo de 24 horas para que la capa de pavón se asiente y no pierda sus propiedades	

Tabla 3-2. Iteraciones y resultado final del pavonado ácido comercial (elaboración propia)

En el caso de que no se repitiera la secuencia un mínimo de seis veces y, no se dejara asentarse la capa de pavonado sobre la pieza en aceite, un mínimo de 24 horas, el pavonado no tardaría en oxidarse de nuevo, perdiendo así sus propiedades estéticas y de protección contra la oxidación (ver Figura 3-8).



Figura 3-8. Clavo sobre el que se aplicó una capa de pavón y se dejó a la intemperie (elaboración propia)

3.2 Método 2: Pavonado clásico en aceite

El pavonado clásico en aceite es un proceso utilizado para endurecer elementos de acero de alto contenido de carbono. La técnica implica sumergir el acero caliente en aceite, lo que produce un enfriamiento rápido que altera la estructura cristalina del acero, formando una red de partículas duras conocidas como "martensita". Este endurecimiento es fundamental para mejorar la resistencia y durabilidad del acero.

Sin embargo, la capa de aceite carbonizado en la superficie del acero no es el objetivo principal del proceso. Esta capa, aunque puede parecer desordenada y poco estética, es simplemente un efecto secundario del proceso de enfriamiento en aceite.

3.2.1 Material necesario

En este método clásico, no son necesarios tantos materiales como el anterior ya que se trata de un pavonado clásico practicado antiguamente:

- Aceite. Aunque vale cualquiera, se obtienen mejores resultados con aceite de coche usado.
- Recipiente de dimensiones suficientes para sumergir la pieza (en nuestro caso olla de acero inoxidable)
- Soplete de propano/butano
- Acetona/desengrasante
- Medios de protección individual

3.2.2 Desarrollo del proceso

El pavonado clásico en aceite es un proceso meticuloso que se ha utilizado para proteger piezas metálicas, armas, armaduras y otras piezas de forja, de la oxidación. Antes de comenzar el pavonado, al igual que el método anterior, es necesario eliminar completamente cualquier rastro de óxido de las piezas a tratar, ya sea con una lija o pulidora (ver Figura 3-3). Una vez limpias (ver Figura 3-4), las piezas se atan con un alambre (ver Figura 3-9) o, en nuestro caso, por mayor comodidad, se sujetan con unas pinzas de acero inoxidable para facilitar su manipulación durante el proceso de pavonado.



Figura 3-9. Piezas de acero sujeta por un alambre (elaboración propia)

Para el pavonado al aceite, se puede utilizar una variedad de aceites disponibles. Desde usado, la mejor opción, o nuevo de motor de coche, hasta aceite de cocina como el de oliva o girasol. Además, existen aceites específicamente diseñados para pavonar en el mercado, en este caso se opta por un aceite de motor nuevo.

El paso crítico del proceso implica calentar las piezas de acero a pavonar a una temperatura adecuada para garantizar una buena adherencia del aceite al metal. Para ello, se utiliza un soplete de butano y se calienta hasta alcanzar una temperatura de 300 °C (ver Figura 3-10), temperatura a la que adquiere la pieza un tono azulado sin llegar a ponerse roja.



Figura 3-10. Proceso de calentamiento de la pieza hasta alcanzar los 300°C (elaboración propia)

Una vez alcanzada la temperatura adecuada, se observa cómo la pieza adquiere un tono azulado que justifica su denominación de "pavonado" o "azulado". Posteriormente, se sumerge en aceite caliente y se mantiene sumergida hasta enfriarse completamente (ver Figura 3-11). Durante este proceso inicial, la pieza va adquiriendo el característico tono negro del pavonado. Esta etapa es esencial para garantizar que la pieza obtenga la calidad y el aspecto deseados al finalizar el proceso de pavonado.



Figura 3-11. Pieza de acero, enfriada tras haberla calentado, sumergida en aceite de motor (elaboración propia)

Después de que las piezas se hayan enfriado por completo, se sacan del aceite y se limpia el exceso con un trapo. En este punto, se verifica que las piezas tengan un color azul/negro oscuro uniforme en toda la superficie, lo que indica un pavonado exitoso. Cualquier área con un color diferente o más claro requerirá repetir el proceso tantas veces como sea necesario, suelen ser dos o tres veces (ver Figura 3-12).



Figura 3-12. Repetición del proceso de calentamiento (elaboración propia)



Figura 3-13. Acabado de pavonado al aceite, se aprecia el tono azulado (elaboración propia)

3.3 Método 3: Pavonado químico alcalino

El pavonado químico alcalino es el proceso de pavonado habitualmente utilizado en la protección de armas de fuego largas y cortas. Consiste en generar una capa superficial duradera y efectiva sobre el metal mediante una reacción química. En este caso, se utilizan productos como la sosa cáustica (hidróxido de sodio, NaOH) y el nitrato de potasio (KNO_3) para lograr este efecto.

La sosa cáustica es un compuesto químico muy utilizado en diversas industrias y también en aplicaciones domésticas, conocida por su efectividad como desatascador de tuberías. Cuando la sosa cáustica se mezcla con agua o se neutraliza con un ácido, libera una cantidad considerable de calor que puede ser suficiente para iniciar la combustión de materiales inflamables.

La solución resultante de esta mezcla con agua se llama lejía de sosa. Por otro lado, el nitrato de potasio se obtiene a partir de una reacción química y es comúnmente utilizado para aportar potasio a la tierra en la agricultura. La reacción entre la sosa cáustica y el nitrato de potasio produce el típico color negro intenso del pavonado. La proporción de nitrato de potasio en la mezcla determinará el tono final del color, siendo más negro cuanto más nitrato se utilice y más marrón cuanto menos se utilice.

Es importante destacar que el nitrato de potasio es altamente inflamable, por lo que se debe manipular con precaución y evitar su exposición a llamas o superficies incandescentes. El agua utilizada en el proceso se recomienda que sea destilada para evitar la presencia de minerales pesados que puedan interferir en el pavonado. Sin embargo, también se puede utilizar agua corriente del grifo, siempre y cuando sea de buena calidad.

Es importante mantener una temperatura constante durante todo el proceso de 150 ± 10 °C, para lo cual se emplea un termómetro de laboratorio con un rango de temperatura adecuado. Temperaturas inferiores a los 140 °C no aportarían los Julios de calor necesarios para la efectividad del proceso. Temperaturas superiores a los 160 °C quemarían la mezcla, impidiendo que pueda ser reutilizada.

La principal desventaja de este proceso es su toxicidad, tanto de la mezcla utilizada como de los vapores generados. Es un proceso que no puede realizarse en entornos cerrados y que puede deteriorar los componentes utilizados para su realización (por ejemplo, hornillos).

3.3.1 Material necesario

Los materiales necesarios para este proceso incluyen:

- Hidróxido de sodio (sosa/soda cáustica) de pureza igual o superior a 99%
- Agua destilada, preferiblemente
- Nitrato de potasio puro
- Olla de acero inoxidable
- Acetona/desengrasante
- Hornillo de gas propano
- Aceite (tipo SAE90)
- Guantes de látex
- Medios de protección individuales (mascarilla, gafas y guantes)

3.3.2 Desarrollo del proceso

El proceso de pavonado químico alcalino se lleva a cabo siguiendo varios pasos meticulosos. Para comenzar, es fundamental asegurarse de que las piezas a pavonar estén completamente pulidas (ver Figura 3-3) y libres de cualquier residuo de grasa o suciedad, ya que esto podría afectar negativamente al resultado final.

Una vez que las piezas están preparadas, se procede a limpiarlos a fondo con acetona para garantizar una superficie limpia (ver Figura 3-4). Es importante utilizar guantes de látex durante este proceso para evitar la contaminación de la superficie con grasa de la piel.

Para realizar el pavonado, se necesita un recipiente de acero inoxidable debido a su fácil limpieza y resistencia a los residuos de pavonado. Nunca se debe utilizar un recipiente de aluminio, cobre o con superficie esmaltada, ya que podrían reaccionar violentamente con la mezcla utilizada.

Se añade agua al recipiente y luego se agregan la sosa cáustica y el nitrato de potasio. La unidad estándar de mezcla sigue las siguientes proporciones:

- 1 l de agua destilada
- 330 g de Nitrato de Potasio
- 1 kg de Hidróxido de sodio

Si se desea un acabado “más negro” podrá añadirse hasta un 15% más de nitrato de potasio. Para un acabado menos intenso podrá reducirse la cantidad en el mismo porcentaje.

En el interior de la olla de Inox se realiza la mezcla (ver Figura 3-14) y se procede a calentarla hasta 150 °C con ayuda de un hornillo de gas o similar.



Figura 3-14. Proceso de calentamiento de la mezcla (elaboración propia)

Una vez que la mezcla alcanza la temperatura adecuada, se introducen las piezas en el recipiente y, con ayuda de unos alambres, se comprobará que no toquen el fondo ni los laterales para garantizar un pavonado uniforme, ver Figura 3-15. Se deja que las piezas permanezcan en la mezcla durante unos 20/25 minutos, aunque es posible que sea necesario un tiempo adicional si la tonalidad no es uniforme. El resultado puede ir comprobándose a lo largo del proceso, mediante la extracción de la pieza para una comprobación visual del acabado. Sin embargo, es fundamental no alterar la composición de la mezcla durante el mismo, por motivos de seguridad.



Figura 3-15. Introducción de las piezas en la mezcla (elaboración propia)

Una vez que las piezas adquieren la tonalidad deseada, se retiran del recipiente de pavonado y se sumergen en agua hirviendo durante unos 10 minutos para eliminar los restos de los ingredientes (ver Figura 3-16).



Figura 3-16. Piezas sumergidas en agua destilada hirviendo (elaboración propia)

Es importante esperar hasta que la mezcla de pavonado adquiera la misma temperatura que el agua hirviendo (ver Figura 3-17), para poder retirar las piezas de la mezcla, en caso contrario, la capa de magnetita se transformará en óxido de hierro de nuevo (ver Figura 3-18). Después de limpiar las piezas, se sumergen en aceite mineral hasta que se enfríen para prolongar la durabilidad del pavonado.



Figura 3-17. Enfriamiento de las piezas en la mezcla de pavonado (elaboración propia)



Figura 3-18. Transformación de magnetita del pavonado en óxido de hierro (elaboración propia)

Finalmente, se observa en la Figura 3-19, se retira el exceso de aceite con una servilleta de papel y se deja que las piezas reposen con una fina capa de aceite durante una noche o medio día para completar el proceso. El resultado final es un pavonado de tonalidad negra brillante y duradero.



Figura 3-19. Finalización del pavonado, reposo de las piezas en aceite (elaboración propia)

3.4 Método 4: Pavonado en óxido rojo

El pavonado en óxido rojo es un método de protección superficial utilizado en la industria metalúrgica para prevenir la corrosión y mejorar la estética de las piezas metálicas. Combina elementos del pavonado en caliente y en frío para lograr un acabado resistente y atractivo. Este pavonado posee una serie de atributos que lo hacen altamente favorable en entornos domésticos.

En el pavonado en caliente, la pieza metálica se sumerge en una solución alcalina a alta temperatura, lo que provoca la formación de una capa de óxido de hierro (Fe_2O_3) sobre su superficie. Esta capa proporciona protección contra la corrosión al crear una barrera entre el metal y el entorno.

Por otro lado, en el pavonado en frío, la pieza se trata con una solución ácida a temperatura ambiente para promover la oxidación controlada del metal. Esta técnica también genera una capa de óxido, pero de menor espesor y adherencia en comparación con el pavonado en caliente.

En este proceso de pavonado se combina lo mejor de ambos métodos. Destaca por su notable resistencia y su carácter no tóxico, lo que lo convierte en una elección segura para diversas aplicaciones. Sin embargo, su proceso de trabajo es notablemente lento, requiriendo hasta una hora para completarse, lo que puede ser considerado como una desventaja en situaciones donde la eficiencia es crucial. Además, se ha observado que puede manifestar cierta agresividad hacia las piezas con las que entra en contacto durante su manipulación, llegando a causar deterioro en el acero según reportes de algunos artesanos.

Primero, se aplica una solución ácida (en nuestro caso, vinagre) sobre la pieza metálica para activar la reacción y posteriormente se le introduce en un medio altamente oxidante (en nuestro caso peróxido de hidrógeno —agua oxigenada— con cloruro sódico —sal común—) para generar una capa superficial de óxido. Finalmente, se le aportan calorías para convertir dicha capa de óxido de hierro en magnetita. La alta temperatura del agua promueve la conversión del óxido de hierro (Fe_2O_3) en magnetita (Fe_3O_4), una forma más estable y resistente de óxido de hierro, como se comprueba en las ecuaciones 3.1 y 3.2. La magnetita forma una capa protectora sobre el metal, mejorando su resistencia a la corrosión.



3.4.1 Material necesario

Como se ha introducido en el apartado anterior, los materiales necesarios para provocar la oxidación del acero y, su posterior reducción a magnetita, son los siguientes:

- Acetona/desengrasante
- Vinagre
- Agua oxigenada
- Sal
- Olla
- Hornillo de propano/butano
- Pistola de calor
- Medios de protección individual

3.4.2 Desarrollo del proceso

Antes de iniciar el proceso de pavonado, es esencial verificar que las piezas estén meticulosamente pulidas y sin rastro alguno de grasa o suciedad (ver Figura 3-3), dado que estos elementos podrían influir negativamente en el acabado final. Una vez que las piezas estén debidamente preparadas, se lleva a cabo

una limpieza exhaustiva con acetona para asegurar una superficie impecable antes de proseguir con el pavonado (ver Figura 3-4). A continuación, se introducen las piezas en vinagre durante aproximadamente cinco minutos para activar la reacción química (ver Figura 3-20). Esto ayudará a preparar la superficie del metal para la posterior formación del óxido rojo.



Figura 3-20. Piezas de acero sumergidas en vinagre para activar reacciones químicas (elaboración propia)

Se prepara una solución saturada de agua oxigenada con sal común y se calentará suavemente sin que llegue a hervir. Esta mezcla actuará como agente oxidante para acelerar la formación del óxido rojo en la superficie del metal. Una vez preparada, se aplica la mezcla sobre la pieza metálica, comprobando que se cubra toda la superficie de manera uniforme (ver Figura 3-21). La pieza debería comenzar a adquirir un tono oxidado a medida que la mezcla actúa sobre el metal. Se ayuda al secado con una pistola de calor a baja temperatura (ver Figura 3-22). Se repetirá este paso dos veces.



Figura 3-21. Aplicación de oxidante sobre las piezas de acero (elaboración propia)

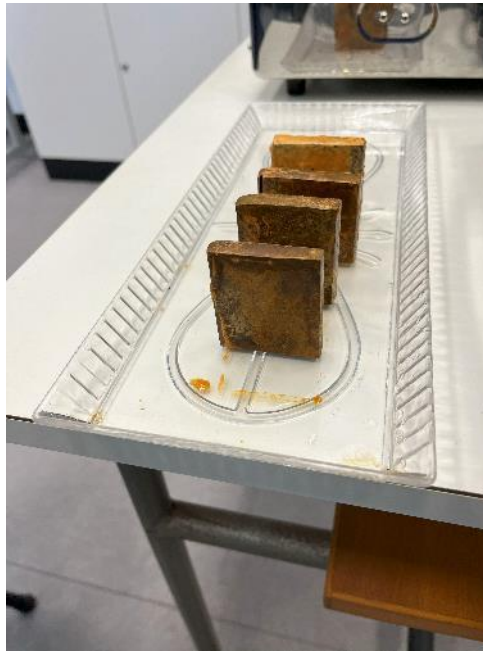


Figura 3-22. Piezas de acero tras el secado con pistola de calor (elaboración propia)

Una vez secas, se limpian las piezas de acero ligeramente con un trapo para remover excedentes del óxido y, se introducen en el agua hirviendo, preferiblemente destilada, durante aproximadamente cinco minutos. Durante este paso, el óxido de hierro (Fe_2O_3) se transformará en magnetita (Fe_3O_4), como se puede apreciar en la Figura 3-23.



Figura 3-23. Transformación de óxido de hierro (Fe_2O_3) en magnetita (Fe_3O_4) (elaboración propia)

Se repetirán los anteriores pasos, entre cuatro y cinco veces para construir gradualmente la capa de pavonado en la superficie del metal. Una vez finalizadas las cinco iteraciones, se hervirán las piezas de acero en agua, destilada preferiblemente, durante 20 minutos para sellar el pavonado y mejorar su durabilidad, como se puede comprobar en la Tabla 3-3.

Aplicación sucesiva de la mezcla oxidante sobre las piezas de acero, de forma uniforme. Se aprecia como en cada iteración las piezas van adquiriendo el color característico del pavonado.



Posterior secado con pistola de calor a baja temperatura. Se aprecian los excedentes de óxido en la superficie de las piezas de acero



Una vez introducidas en el agua hirviendo durante cinco minutos, se aprecia la transformación del óxido rojo en magnetita



Para finalizar se introducen las piezas de acero 20 minutos en agua hirviendo, para sellar el pavonado y mejorar su durabilidad.



Tras los 20 minutos de hervido de las piezas, se aprecia el resultado final del pavonado antes de limpiar las piezas e introducirlas en aceite.



Tabla 3-3. Iteraciones y resultado final del pavonado en óxido rojo (elaboración propia)

Una vez completado el proceso de pavonado, se secarán las piezas completamente, se les removerán los excedentes de óxido y luego se dejarán reposar en aceite SAE90 durante al menos 24 horas para proporcionar una capa adicional de protección y mejorar su acabado final.

3.5 Metodología de la prueba de estrés

3.5.1 Entornos de estrés seleccionados

La evaluación de los métodos de pavonado se llevó a cabo en diversos entornos de estrés cuidadosamente seleccionados para simular las condiciones a las que podrían enfrentarse las unidades de la Armada durante sus operaciones. Estas áreas fueron elegidas específicamente por su similitud con entornos marinos reales, caracterizados por la presencia de salinidad que aumenta significativamente la corrosión del acero. Además, se consideró la humedad ambiental y la exposición a la intemperie, replicando fielmente las condiciones climáticas extremas a las que están expuestas los buques de guerra en su entorno operativo.

Al exponer las muestras pavonadas a estos entornos, se aceleró el proceso de oxidación, permitiendo una evaluación más precisa de la efectividad de cada método de protección contra la corrosión. Con esta aproximación realista se busca obtener datos relevantes sobre la resistencia y durabilidad de los recubrimientos ante condiciones adversas, fundamentales para determinar su idoneidad para su implementación en los buques de la Armada. Como se puede comprobar en la Tabla 3-4, los lugares seleccionados fueron los siguientes:

ENTORNOS DE ESTRÉS SELECCIONADOS		
LANCHAS DE INSTRUCCIÓN		
1		Esta ubicación es ideal para la evaluación de métodos de pavonado debido a la similitud con la cámara de máquinas de un buque de guerra y con otros espacios cerrados de los buques, como el pañol de armas. Al ser un entorno cerrado, proporciona condiciones controladas que permiten una evaluación precisa de la efectividad de los recubrimientos contra la corrosión. Además, la presencia de un ambiente salino en este entorno replicaría fielmente las condiciones encontradas en las operaciones navales regulares, ya que las lanchas navegan semanalmente.

TERRAZA DEL PAÑOL DE MÚSICA		
2		Esta ubicación también es excelente para la evaluación de métodos de pavonado debido a su cercanía al mar y las condiciones climatológicas similares a las encontradas en el entorno marino. La terraza al lado del mar proporciona un ambiente abierto y expuesto, lo que permite una exposición directa a la humedad y la salinidad del aire y a las condiciones meteorológicas al encontrarse a la intemperie, factores clave en la oxidación del acero. La presencia de humedad y salinidad en este entorno permite replicar condiciones marinas realistas.
PISCINA		
3		La piscina, a pesar de no ser un entorno marino directo, puede ser útil para evaluar métodos de pavonado. Su alta humedad proporciona una simulación parcial de las condiciones marinas, permitiendo pruebas realistas de resistencia a la corrosión. Al ser un espacio cerrado, ofrece control sobre factores ambientales como temperatura y humedad, garantizando la reproducibilidad de las pruebas. Además, su disponibilidad y accesibilidad hacen que sea una opción práctica para la investigación de recubrimientos protectores.

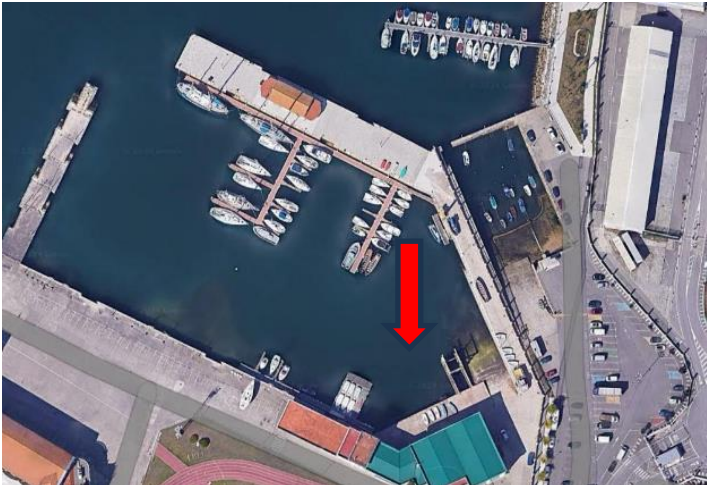
PANTALÁN, EN INMERSIÓN		
4		Sumergir las muestras pavonadas en agua de mar es beneficioso para evaluar la similitud, más fielmente, la exposición directa al ambiente marino. Hundir las muestras permitiría una evaluación exhaustiva de la resistencia a la oxidación en un entorno acuático, expuesto a las corrientes marinas, cambios de temperatura y partículas en suspensión en la mar.

Tabla 3-4. Entornos de Estrés a las que se someterán las muestras (elaboración propia)

El tiempo de exposición de las piezas a los distintos entornos seleccionados fue de cuatro semanas.

3.5.2 Microscopio Dino-Lite

Una vez finalizado el ensayo de estrés de las muestras en los diferentes entornos, se procederá a realizar un análisis microscópico de las mismas, con el objetivo de analizar con más detalle la efectividad de los diferentes procesos de pavonado. Para ello, se empleará el microscopio Dino-Lite AM4515T5, ver Figura 3-24.

Los microscopios digitales Dino-Lite son herramientas de inspección microscópica que combinan portabilidad y versatilidad. Permiten aumentos de hasta 900x y cuentan con una óptica de alta calidad que puede generar imágenes de hasta 5 megapíxeles. Su software incorpora una variedad de funciones y su hardware presenta características avanzadas. El AM4515T5 de Dino-Lite, es un microscopio digital que destaca por sus características únicas. Se utiliza ampliamente en campos como la investigación biomédica y científica, el análisis de materiales y la inspección electrónica, así como en cualquier otra aplicación que requiera un alto nivel de aumento, versatilidad y movilidad [60].

Este modelo viene con el software DinoCapture 2.0, que es fácil de usar y ofrece una serie de funciones útiles. Entre ellas se incluyen la Lectura Automática de Aumentos (AMR), la calibración, la medición, la captura y anotación de imágenes y la grabación de vídeo. Estas características hacen del AM4515T5 una herramienta de inspección muy completa y versátil.



Figura 3-24. Microscopio Dino-Lite AM4515T5 (elaboración propia)

4 RESULTADOS

La sección de resultados de este estudio sobre pavonado para protección contra la oxidación en piezas de acero, con intención de implementarlo en talleres de buques de la Armada, ofrece una mirada detallada sobre la efectividad y viabilidad de diversos métodos evaluados. En este contexto, se abordan los objetivos principales y complementarios del proyecto, los cuales se enfocan en garantizar la durabilidad, rendimiento y capacidad operativa de las unidades en condiciones marinas altamente corrosivas.

Al evaluar los distintos métodos de pavonado disponibles, se busca comprender sus características y aplicabilidad específica en la protección contra la oxidación. A través de la aplicación de estos métodos a muestras de acero utilizadas en la construcción naval, se analizará la calidad, uniformidad y adherencia de los recubrimientos resultantes.

En consecuencia, las muestras pavonadas se someten a pruebas rigurosas de resistencia a la corrosión en los entornos de estrés mencionados anteriormente, permitiendo así comparar los resultados obtenidos y determinar la eficacia relativa de cada método. Este análisis detallado de los datos generados en las pruebas proporciona información para concluir sobre la idoneidad y limitaciones de cada método de pavonado en la protección contra la oxidación.

4.1 Lanchas de instrucción

Este entorno, en el interior de la cámara de máquinas de las lanchas de instrucción, es considerado idóneo para probar métodos de pavonado porque se asemeja mucho a la sala de máquinas de un barco de guerra y otros espacios cerrados de los barcos. Al ser un espacio cerrado, ofrece condiciones controladas que nos permiten evaluar con precisión qué tan efectivos son los recubrimientos contra la corrosión a lo largo del tiempo.

Además, la presencia de una atmósfera salina en este lugar reproduce las condiciones en las que se encuadran las operaciones navales habituales.

En primer lugar, como se muestra en la Tabla 4-1, se pueden observar las piezas de acero sin restos de óxido en su superficie. Las piezas fueron depositadas el día 3 de marzo, en el pañol de máquinas de la “G.M. Salas”, previo a su navegación programada para instrucción y adiestramiento de los alumnos de la Escuela Naval Militar (ENM).

1	PIEZA ORIGINAL	
2	MÉTODO 1: PAVONADO EN ÁCIDO COMERCIAL	
3	MÉTODO 2: PAVONADO CLÁSICO EN ACEITE	
4	MÉTODO 3: PAVONADO QUÍMICO ALCALINO	
5	MÉTODO 4: PAVONADO EN ÓXIDO ROJO	

Tabla 4-1. Distribución piezas de acero depositadas en las lanchas de instrucción (elaboración propia)

Durante el seguimiento de la evolución de las muestras de acero en un entorno de estrés y su protección contra la oxidación, se realizaron inspecciones periódicas desde el día de deposición de las piezas. Tras tres días de exposición, específicamente el 6 de marzo, no se identificaron cambios significativos en las muestras de acero. Luego, al alcanzar una semana de exposición, el domingo 10 de marzo, se volvieron a capturar imágenes de las piezas (omitidas en esta memoria), notándose apenas signos de oxidación en las piezas pavonadas, mientras que en la pieza sin tratamiento comenzaron a evidenciarse signos de oxidación superficial. Además, en la muestra pavonada con ácido comercial, se comenzó a notar un cambio en el color característico del pavonado, pasando de negro a un tono más marrón, típico del óxido.

A los nueve días de exposición, no se observaron cambios significativos en las piezas, demostrando su resistencia a la oxidación en este ambiente. Este patrón se mantuvo incluso después de dos semanas, donde tampoco se apreciaron cambios notables. Sin embargo, tras 18 días de exposición, se observó que las muestras tratadas con el Métodos 1: Ácido comercial y Método 4: Óxido rojo habían perdido parte de su color negro característico, siendo la muestra pavonada con el Método 3: Químico alcalino la que mejor conservaba su tonalidad.

Finalmente, al completarse cuatro semanas de exposición, como se observa en la Figura 4-1, se pudo concluir que todos los métodos de pavonado demostraron ser resistentes a la oxidación en este ambiente sin ningún tipo de tratamiento adicional para mantener la capa de pavonado. En términos estéticos, se

destacó que la muestra pavonada con el Método 3: Químico alcalino fue la que mejor conservó su color negro característico a lo largo del periodo de exposición.



Figura 4-1. Muestras en la cámara de máquinas tras cuatro semanas de exposición (elaboración propia)

4.1.1 Análisis microscópico: Lanchas de instrucción

A continuación, se realiza el análisis microscópico de las muestras de acero del interior de un buque tras cuatro semanas. Para ello, como se mencionó anteriormente se utiliza el microscopio de la marca Dino-Lite:

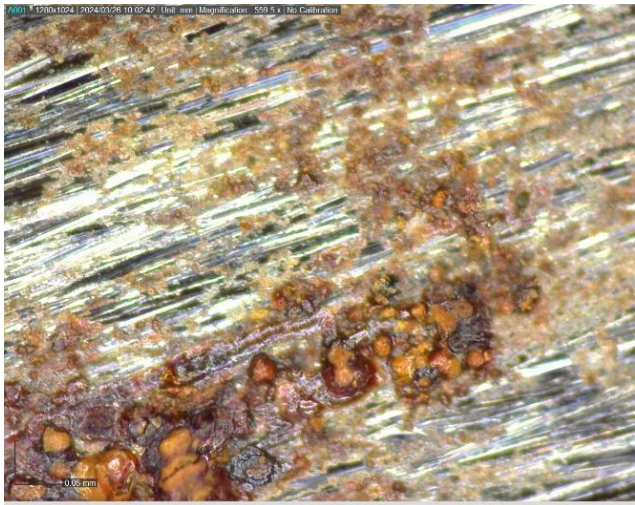
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MUESTRA ORIGINAL LANCHAS DE INSTRUCCIÓN	
MACRO	MICRO
	
Se puede observar las partículas de óxido que comienzan a crecer en la superficie del acero. A simple vista no se aprecia la cantidad de óxido que se puede ver con el microscopio	

Tabla 4-2. Análisis microscópico de la muestra original de las lanchas de instrucción (elaboración propia)

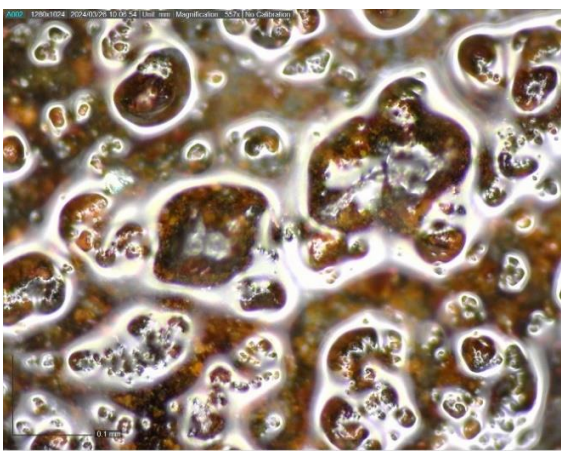
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 1 LANCHAS DE INSTRUCCIÓN	
MACRO	MICRO
	
Se observa como a simple vista parece encontrarse en buen estado. Sin embargo, a nivel microscópico, se ve como ya se estaba formando óxido en la superficie	

Tabla 4-3. Análisis microscópico del Método 1 de las lanchas de instrucción (elaboración propia)

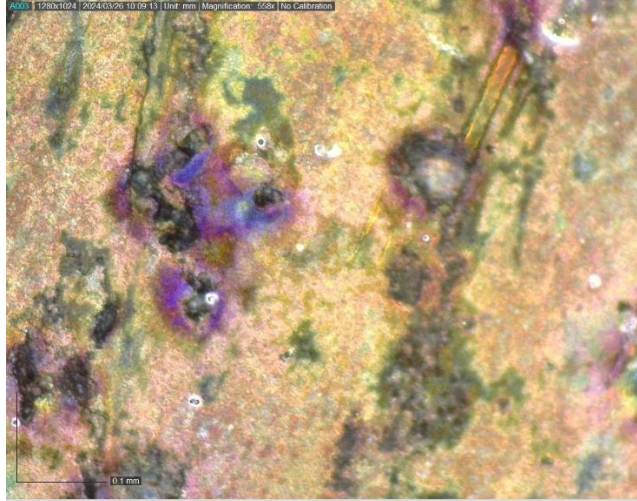
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 2 LANCHAS DE INSTRUCCIÓN	
MACRO	MICRO
	
Se observa como el proceso de oxidación ya había comenzado aunque, a nivel superficial, no se apreciaban indicios	

Tabla 4-4. Análisis microscópico del Método 2 de las lanchas de instrucción (elaboración propia)

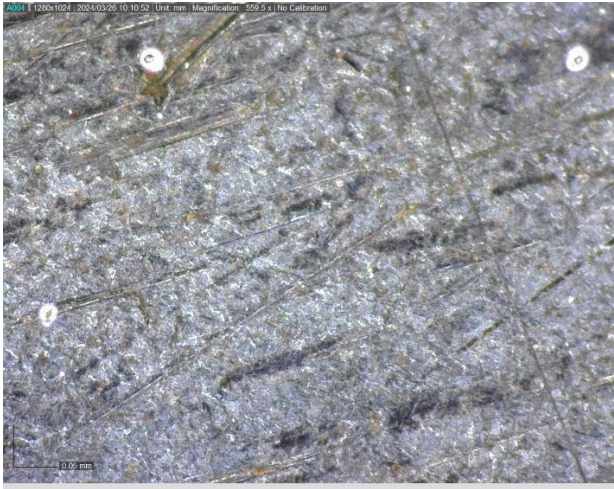
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 3 LANCHAS DE INSTRUCCIÓN	
MACRO	MICRO
	
Se aprecia como este método ofreció protección contra la oxidación a la pieza de acero, no apreciándose signos de óxido en la superficie	

Tabla 4-5. Análisis microscópico del Método 3 de las lanchas de instrucción (elaboración propia)

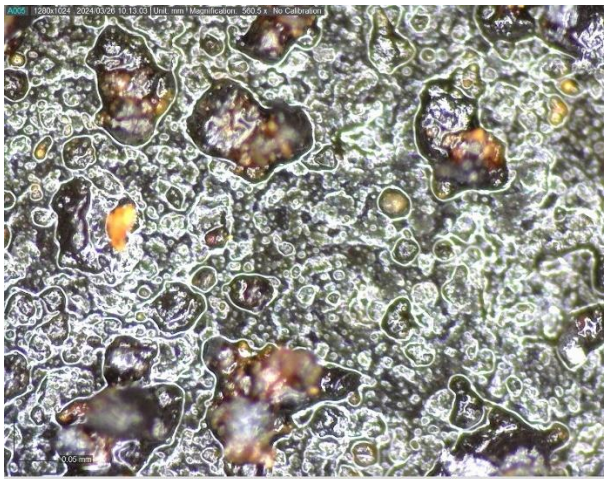
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 4 LANCHAS DE INSTRUCCIÓN	
MACRO	MICRO
	
Comienzan a aparecer pequeñas partículas de óxido a nivel microscópico. A nivel superficial sigue conservando su acabado	

Tabla 4-6. Análisis microscópico del Método 4 de las lanchas de instrucción (elaboración propia)

4.2 Terraza del pañol de música

Este lugar, como se expuso con anterioridad, también resulta ideal para comprobar el comportamiento de las técnicas de pavonado debido a su ubicación costera y su clima que imita fielmente las condiciones del entorno marino. La plataforma junto al mar ofrece un entorno abierto y expuesto, permitiendo una exposición directa a la humedad, la salinidad del aire y las condiciones meteorológicas al estar al aire libre, todos ellos factores fundamentales en el proceso de oxidación del acero.

Las piezas se depositaron el domingo 3 de marzo, sin ningún tipo de defecto superficial. Se depositaron en la terraza que se encuentra encima del laboratorio de investigación del CUD, debajo del panel solar, como se observa en la Figura 4-2.

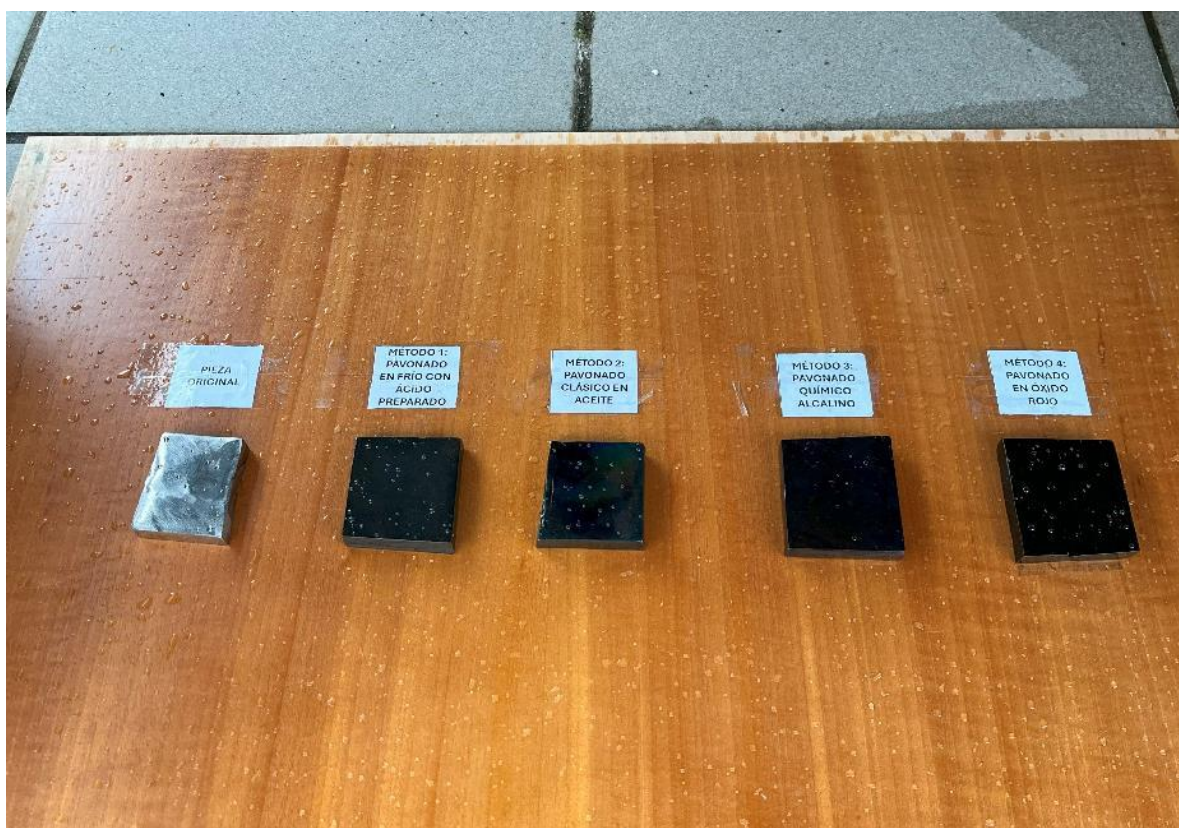


Figura 4-2. Piezas depositadas en la terraza el 3 de marzo (elaboración propia)

Tras tres días de exposición a la intemperie, se puede observar el grado de protección que ofrece la capa de pavonado sobre las piezas, ya que la pieza original se encuentra completamente recubierta de una capa de óxido, mientras que en el resto de las piezas pavonadas no se aprecia ningún ápice a excepción de la pieza en la que se realizó el pavonado químico alcalino. Cabe reseñar que, en la pieza sin pavonar, esta capa de óxido estaba bien adherida mientras que, en la pavonada, era fácilmente removible con el dedo.

Tras una semana de exposición, se encuentran claramente restos de óxido en las piezas pavonadas con el Método 3: Químico Alcalino y en la pieza pavonada en a partir de óxido rojo. Además, se aprecia como en la pieza pavonada con ácido comercial comienza a presentar óxido en su superficie, siendo la pavonada en aceite la única en la que todavía no parece haber comenzado a corroerse. Transcurridos nueve días de exposición en la terraza, el miércoles 13 de marzo, todas las piezas se encuentran oxidadas o con restos de óxido en su superficie. La pieza original y con pavonado químico alcalino son las que más oxidación presentan, seguidas por la que se pavonó a partir de óxido rojo.

Después de dos semanas de exposición, se aprecia óxido en todos los métodos, encontrándose esta capa bastante adherida a la superficie de las piezas. Por último, tras cuatro semanas de exposición, observamos como los distintos métodos de pavonado no han podido ofrecer protección contra la oxidación en este entorno de estrés. Se ha demostrado que, en estos ambientes tan expuestos, sino se realizan tareas de mantenimiento sobre las piezas, el pavonado no resulta tan efectivo. Además, estéticamente, todas las piezas han finalizado con el color característico del óxido (ver Figura 4-3). Sin embargo, la que mejor parece haber resistido a este ambiente corrosivo es la pavonada con ácido comercial.



Figura 4-3. Muestra de la terraza tras cuatro semanas de exposición (elaboración propia)

4.2.1 Meteorología durante la exposición

A continuación, en la Figura 4-4, se observa la meteorología a la que estuvieran expuestas las muestras durante las cuatro semanas de exposición:

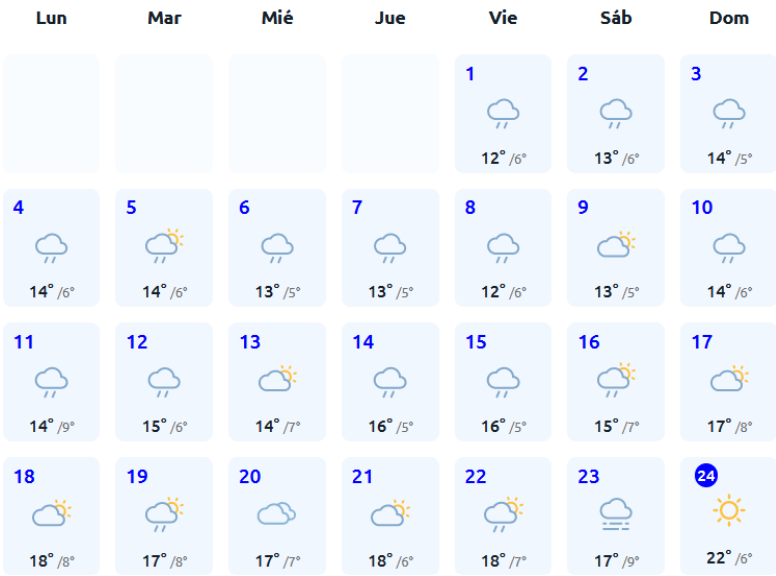


Figura 4-4. Resumen de la meteorología durante el mes de marzo (tomada de [61])

En resumen, en Marín durante el mes de marzo hasta el día 24, transcurrieron 16 días lluviosos y días secos. Las temperaturas oscilaron de media entre 7°C de mínima y 15°C de máxima.

4.2.2 Análisis microscópico: Terraza

A continuación, se realiza el análisis microscópico de las muestras de acero que estuvieron a la intemperie tras cuatro semanas:

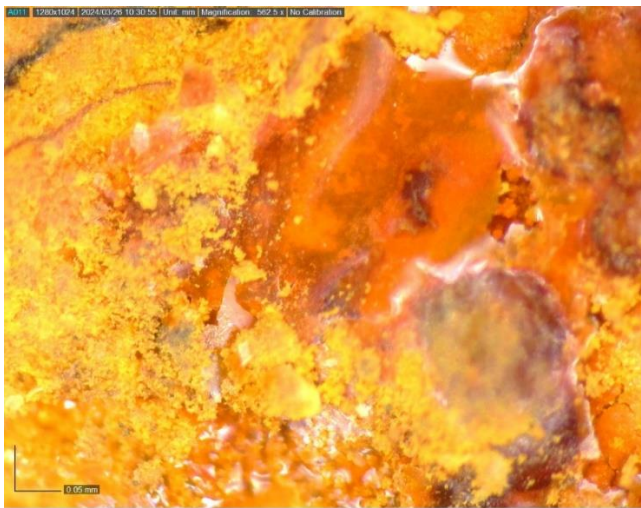
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MUESTRA ORIGINAL TERRAZA	
MACRO	MICRO
	
La pieza original en este entorno, se encuentra completamente oxidada	

Tabla 4-7. Análisis microscópico de la muestra original de la terraza (elaboración propia)

ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 1 TERRAZA	
MACRO	MICRO
	
Estéticamente, este método conserva su apariencia. Sin embargo, se puede observa como se acumulan partículas de óxido sobre la superficie de la pieza	

Tabla 4-8. Análisis microscópico del Método 1 de la terraza (elaboración propia)

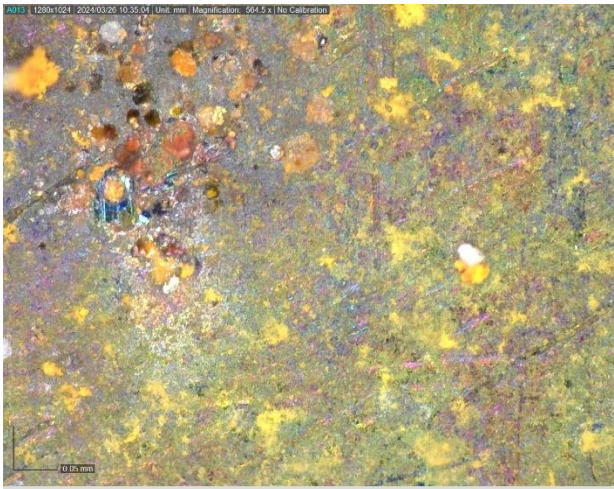
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 2 TERRAZA	
MACRO	MICRO
	
En apariencia, solo algunas partes de la superficie presentan óxido. En realidad, vemos como este óxido se encuentra más expandido de lo que aparenta	

Tabla 4-9. Análisis microscópico del Método 2 de la terraza (elaboración propia)

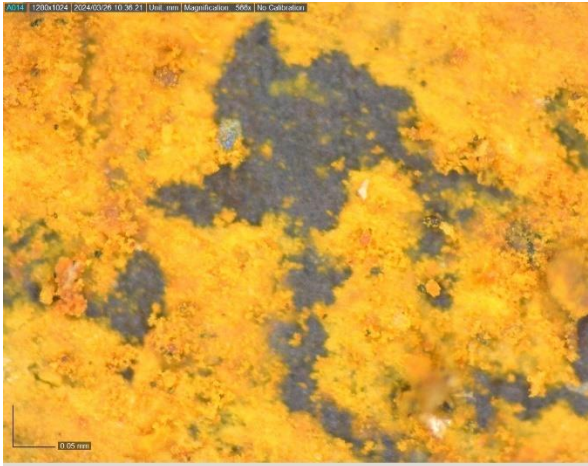
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 3 TERRAZA	
MACRO	MICRO
	
Vemos como este método apenas protege contra la oxidación. A nivel microscópico, hay zonas en las que todavía se aprecia la capa de pavón, no están completamente oxidada la superficie	

Tabla 4-10. Análisis microscópico del Método 3 de la terraza (elaboración propia)

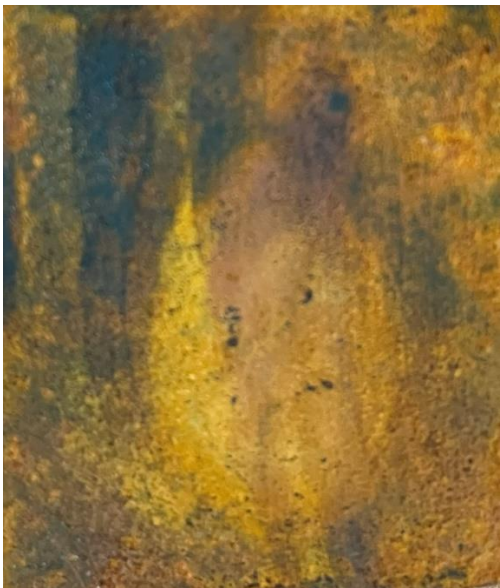
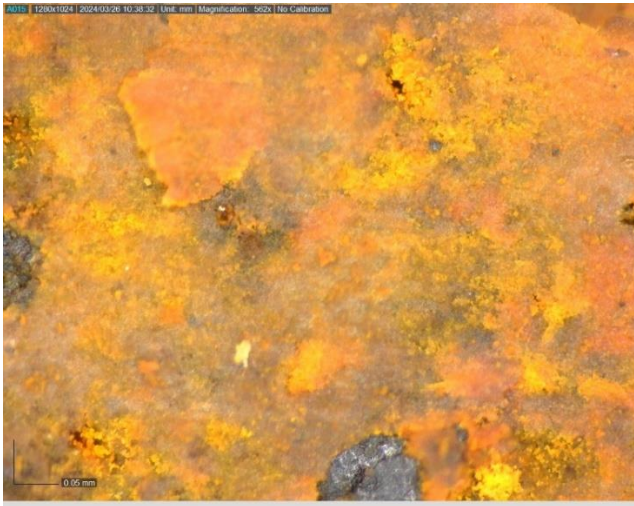
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 4 TERRAZA	
MACRO	MICRO
	
Se encuentra con toda la superficie oxidada, existiendo pequeñas zonas en las que todavía se aprecia la capa de magnetita	

Tabla 4-11. Análisis microscópico del Método 4 de la terraza (elaboración propia)

4.3 Piscina

Anteriormente se ha mencionado que la piscina, aunque no sea un ambiente marino directo, puede servir como un lugar adecuado para evaluar técnicas de pavonado. Debido a su alta humedad, proporciona una simulación parcial de las condiciones marinas, lo que facilita realizar pruebas realistas sobre la resistencia a la corrosión.

Al tratarse de un espacio cerrado, brinda la posibilidad de controlar diversos factores ambientales, como la temperatura y la humedad, lo que asegura la reproducibilidad de los experimentos. Además, su disponibilidad y facilidad de acceso la convierten en una opción práctica para investigar sobre recubrimientos protectores.

En consecuencia, como se ve en la Figura 4-5, se observan las piezas el primer día que son depositadas en la piscina del Gimnasio “G.M. Barrutia” de la ENM, el domingo 6 de marzo.



Figura 4-5. Muestras depositadas en la piscina (elaboración propia)

Después de tres días de exposición, el 6 de marzo, se observa que la única muestra que muestra señales de óxido es la pieza original. Una semana más tarde, se evidencia cómo la oxidación en la pieza original ha avanzado. Además, se comienzan a notar pequeños signos de óxido en las muestras tratadas con los Métodos 1: Ácido Comercial y Método 4: Óxido Rojo.

Después de dos semanas de exposición a la humedad de la piscina, no se detectan cambios significativos en la superficie de las piezas. Se destaca que, en este entorno, los métodos de pavonado han mostrado ser eficaces contra la oxidación.

Finalmente, tras cuatro semanas de exposición en la piscina, no se perciben cambios notables en las muestras. Se llega a la conclusión de que el pavonado proporciona protección a las piezas de acero en este ambiente de alta humedad. Desde el punto de vista estético, todas las piezas pavonadas conservan su apariencia, siendo la tratada con el Método 3: Químico alcalino la que mejor mantiene su aspecto, tal como se aprecia en la Figura 4-6.



Figura 4-6. Muestras de la piscina tras cuatro semanas de exposición (elaboración propia)

4.3.1 Análisis microscópico: Piscina

A continuación, se realiza el análisis microscópico de las muestras de acero que estuvieron en la piscina, en un ambiente con mucha humedad, tras cuatro semanas:

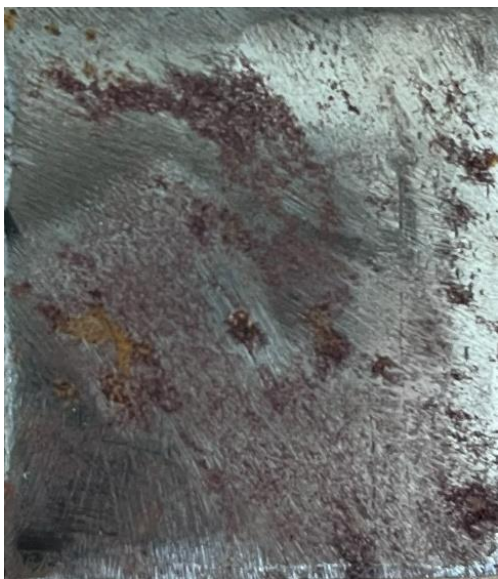
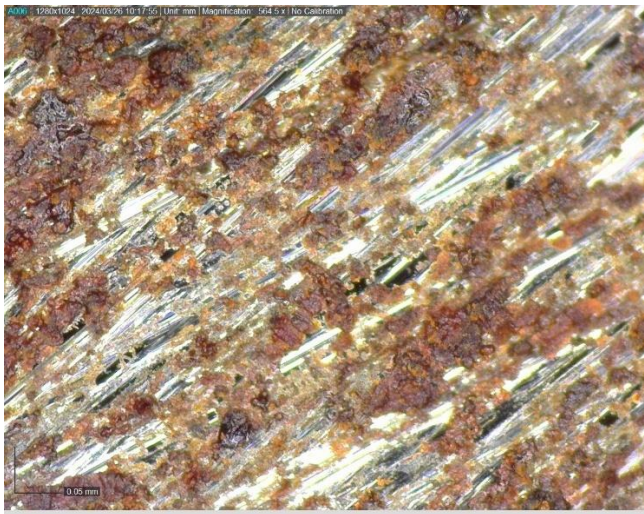
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MUESTRA ORIGINAL PISCINA	
MACRO	MICRO
	
Se encuentra, en apariencia y en la realidad, con partículas de óxido sobre su superficie	

Tabla 4-12. Análisis microscópico de la muestra original de la piscina (elaboración propia)

ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 1 PISCINA	
MACRO	MICRO
	
Se aprecia, como comienzan a aparecer partículas de óxido sobre la superficie. Sin embargo, la mayoría de la muestra todavía conserva la capa de pavonado	

Tabla 4-13. Análisis microscópico del Método 1 de la piscina (elaboración propia)

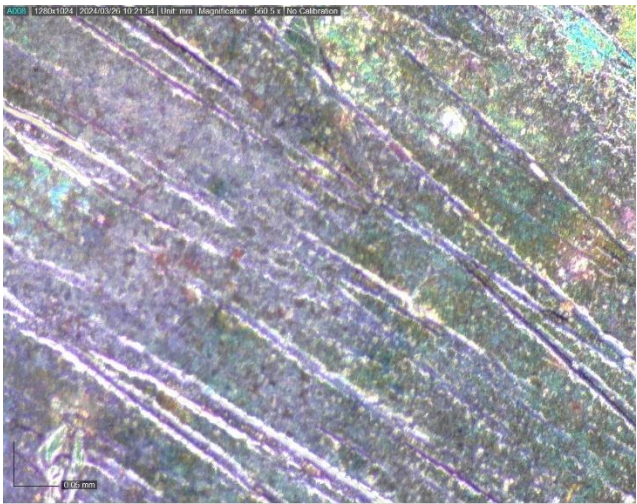
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 2 PISCINA	
MACRO	MICRO
	
No se aprecia ningún resto de óxido sobre la superficie. Este proceso, en este entorno, ofrece protección total contra la oxidación	

Tabla 4-14. Análisis microscópico del Método 2 de la piscina (elaboración propia)

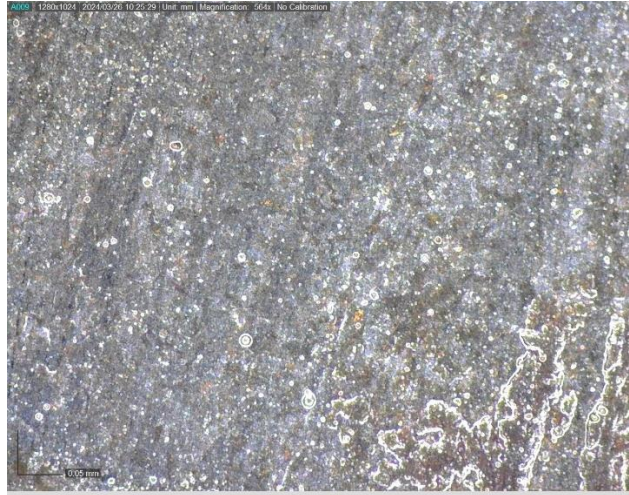
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 3 PISCINA	
MACRO	MICRO
	
Al igual que el proceso anterior, no se observa ningún resto de óxido. Además, tampoco se observa ninguno de los defectos superficiales, debido al pulido, como en el Método 2: Clásico en aceite	

Tabla 4-15. Análisis microscópico del Método 3 de la piscina (elaboración propia)

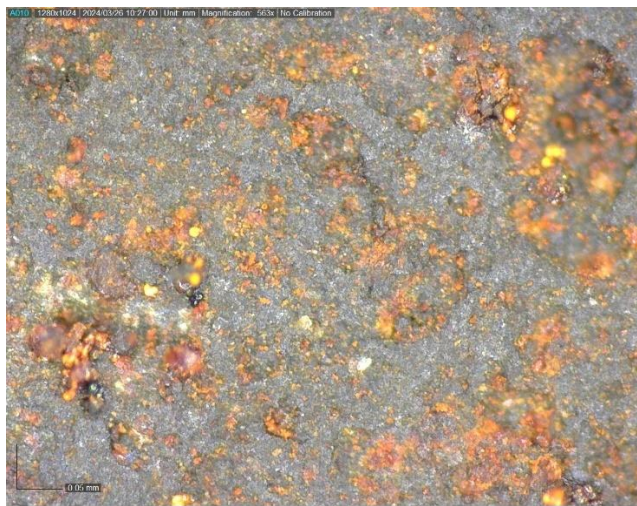
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 4 PISCINA	
MACRO	MICRO
	
Se aprecian signos de óxido sobre la superficie. La capa de magnetita todavía es visible	

Tabla 4-16. Análisis microscópico del Método 4 de la piscina (elaboración propia)

4.4 En inmersión

Por último, como se observó anteriormente, sumergir las muestras pavonadas en agua de mar resulta beneficioso para evaluar de manera más precisa la similitud con la exposición directa al entorno marino. Al sumergir las muestras, se facilita una evaluación exhaustiva de su resistencia a la oxidación en un entorno acuático, expuesto a corrientes marinas, variaciones de temperatura y partículas en suspensión presentes en el mar.

Por lo tanto, el domingo 03 de marzo, se depositan las piezas en el pantalán de la ENM donde se encuentran todas las embarcaciones atracadas. Como se muestra en la Figura 4-7, las piezas se encuentran en el interior de diferentes bolsas junto con otro objeto que facilitara su identificación.



Figura 4-7. Piezas antes de ser sumergidas en el pantalán (elaboración propia)

Una vez identificadas e introducidas en sus bolsas individuales, se procede a sumergirlas, ver Figura 4-8.



Figura 4-8. Piezas sumergidas en el pantalán (elaboración propia)

Tras una semana sumergidas, el domingo 10 de marzo, se observa como la pieza original se encuentra parcialmente oxidada. Por otro lado, el resto de las muestras siguen ofreciendo protección contra la oxidación, aunque han perdido todo su valor estético

Después de dos semanas, el domingo 17 de marzo, la pieza original muestra claros síntomas de desgaste mientras que, el resto de las muestras, parecen estar perdiendo la capa de pavón o, en el caso del Método 3: Químico alcalino, comienzan a aparecer signos de óxido. Sin embargo, se observa como las piezas pavonadas ofrecen protección contra la oxidación en el entorno submarino.

Para finalizar, tras cuatro semanas sumergidas y retiradas de su entorno de estrés, se observa en la Figura 4-9 cómo, al haberse secado, todas se encuentran completamente oxidadas. En el caso de las muestras pavonadas, todas parecen haber perdido la capa de pavón, no habiendo conseguido proteger de la oxidación a las piezas de acero.



Figura 4-9. Muestras retiradas tras cuatro semanas sumergidas (elaboración propia)

4.4.1 Análisis microscópico: Muestras sumergidas

A continuación, se realiza el análisis microscópico de las muestras de acero que estuvieron sumergidas tras cuatro semanas:

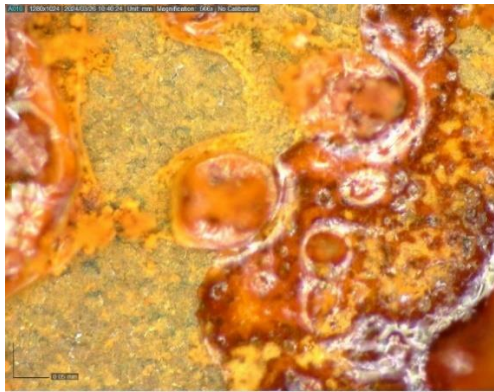
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MUESTRA ORIGINAL SUMERGIDA	
MACRO	MICRO
	
La pieza, una vez retirada, muestra claros indicios de oxidación en toda la superficie	

Tabla 4-17. Análisis microscópico de la muestra original sumergida (elaboración propia)

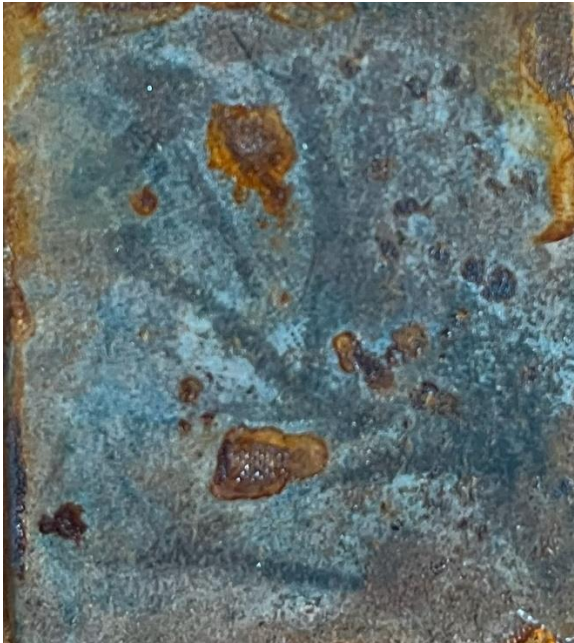
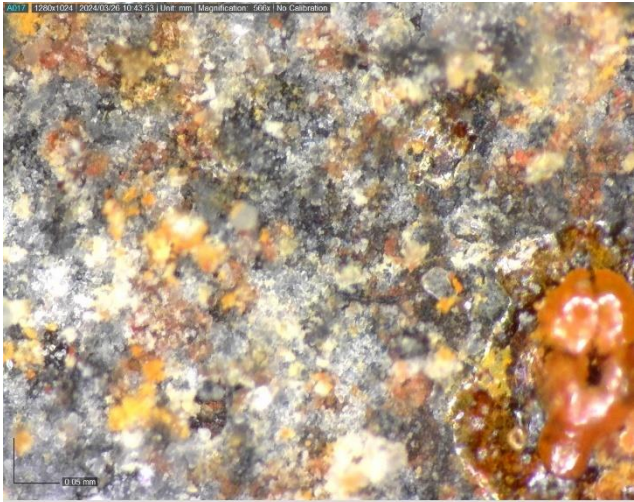
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 1 SUMERGIDO	
MACRO	MICRO
	
Se aprecian signos de óxido en toda la superficie, aunque en apariencia no lo parezca. La capa de pavón es apenas visible	

Tabla 4-18. Análisis microscópico del Método 1 sumergido (elaboración propia)

ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 2 SUMERGIDO	
MACRO	MICRO
	
Se observa todavía con claridad la capa de pavón sobre la superficie a pesar de la cantidad de óxido	

Tabla 4-19. Análisis microscópico del Método 2 sumergido (elaboración propia)

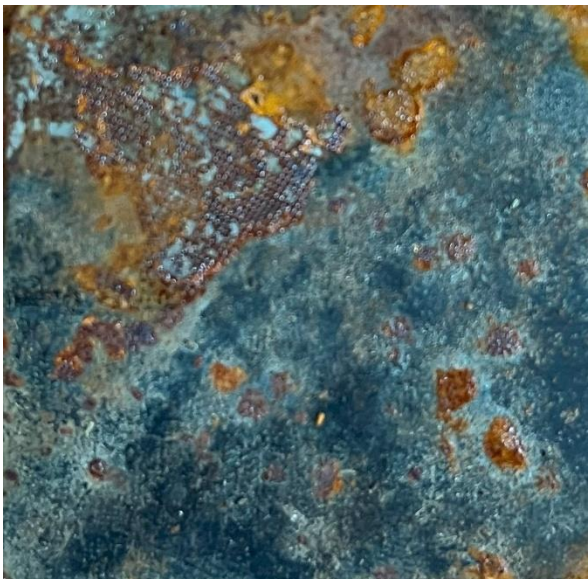
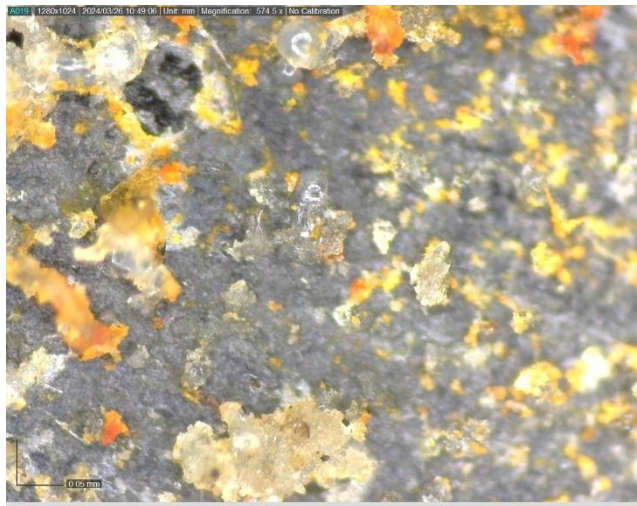
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 3 SUMERGIDO	
MACRO	MICRO
	
No se aprecia una oxidación tan avanzada como en el resto de procesos. Todavía es visible la capa de pavón sobre la superficie	

Tabla 4-20. Análisis microscópico del Método 3 sumergido (elaboración propia)

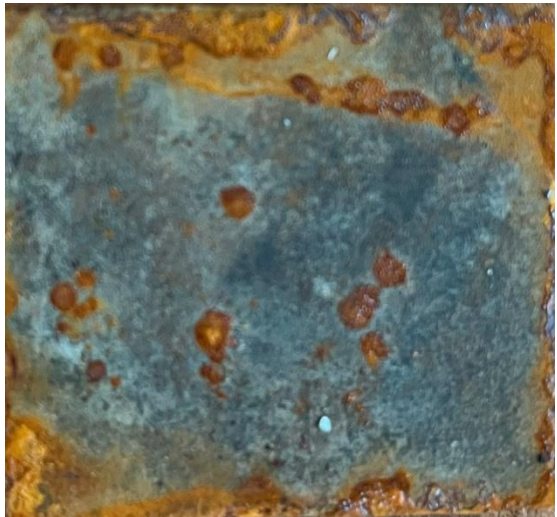
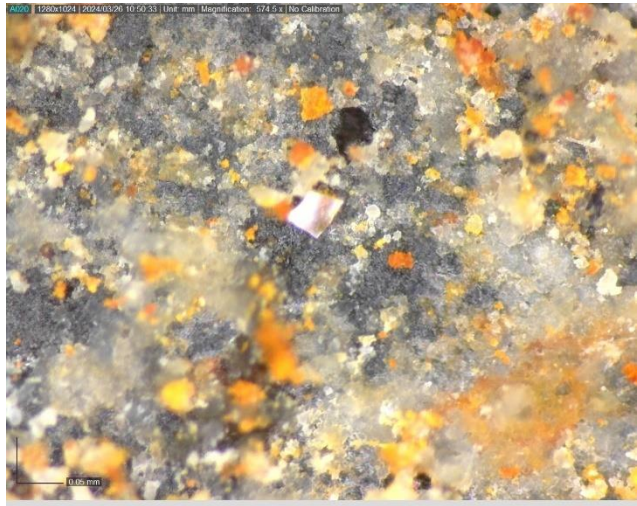
ANÁLISIS MICROSCÓPICO MÉTODO 4 SUMERGIDO	
MACRO	MICRO
	
El pavonado comienza a perderse, aunque no tanto como con otros procesos. Se aprecian cristales de óxido sobre la superficie	

Tabla 4-21. Análisis microscópico del Método 4 sumergido (elaboración propia)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones del trabajo

Después de llevar a cabo un exhaustivo estudio sobre distintos métodos de pavonado, como medio de protección contra la oxidación pensado para componentes metálicos y armas de los buques de la Armada, se ha logrado avanzar en el objetivo principal que buscaba mejorar la durabilidad y, con ello, la capacidad operativa de la flota

El análisis se centró en la evaluación de la viabilidad y efectividad de estos métodos, considerando el ambiente marino altamente corrosivo al que están expuestos los buques. Se buscaba identificar un método de pavonado que no solo ofreciera una protección duradera contra la corrosión, sino que también fuera práctico y factible de implementar en los talleres de los buques, contribuyendo así a mantener la capacidad operativa y la eficiencia de la flota naval en condiciones adversas.

Para alcanzar estos objetivos, se realizaron diversas etapas, incluyendo la identificación y comprensión de los diferentes métodos de pavonado realizados, la aplicación de estos sobre distintas piezas de acero, material altamente usado en industria naval, y la evaluación de la calidad, uniformidad y adherencia de los distintos recubrimientos a lo largo del tiempo de exposición en los diferentes entornos de estrés. En este sentido, se seleccionaron entornos que estuvieran expuestos a las condiciones meteorológicas, a elevadas humedades, al ambiente salino que experimenta un buque y a la propia mar, al encontrarse sumergidas.



Figura 5-1. Metodología seguida para alcanzar los objetivos en el trabajo (elaboración propia)

5.1.1 Grado de satisfacción

Tras analizar detalladamente los resultados de estas pruebas, se ha llegado a conclusiones importantes sobre la idoneidad y las limitaciones de cada método de pavonado en la protección contra la oxidación, así como su viabilidad de implementación en los talleres de los buques de la Armada. En consecuencia, para valorar su idoneidad, se ha tenido en cuenta diferentes aspectos, como el económico, tiempo invertido o su resistencia. Para la calificación, se propone el siguiente nivel de puntuación:

3	Mejor calificación
2	
1	
0	
	Peor calificación

Figura 5-2. Sistema de calificación de las propiedades de los procesos de pavonado (elaboración propia)

	FACILIDAD PROCESO	ACABADO	COSTE	TIEMPO INVERTIDO	RESISTENCIA				Σ
					INTERIOR BUQUE	INTEMPERIE	ENTORNO HÚMEDO	INMERSIÓN	
M1: Ácido comercial	3	1	2	1	0	3	1	1	12
M2: Clásico en aceite	2	0	3	2	1	2	2	2	14
M3: Químico Alcalino	0	3	1	3	3	1	3	3	17
M4: Óxido Rojo	1	2	0	0	2	0	0	0	5

Tabla 5-1. Calificación de las diferentes propiedades para los procesos de pavonado (elaboración propia)

- Facilidad de aplicación:** El Método 1: Ácido comercial, requiere únicamente del producto y su aplicación sobre la superficie del acero, lo cual es relativamente sencillo en comparación con otros métodos que pueden tener requisitos más complicados, como mantener las piezas de acero sin tocar la superficie del recipiente, garantizar la limpieza completa de las piezas, etc.
- Estética:** El pavonado químico alcalino proporciona el mejor acabado estéticamente hablando, con un negro brillante, lo cual puede ser preferible en muchos casos en comparación con acabados de tono azulado u otros.
- Economía:** Aunque los precios son similares entre los métodos, el Método 2: Clásico en aceite (el cual proporciona un tono azulado) requiere menos recursos económicos, ya que solo necesita un soplete y aceite usado, en comparación con otros métodos que pueden necesitar una pistola de calor y hornillo de butano, entre otros materiales.
- Tiempo:** Aunque el Método 1 requiere un tiempo considerable debido al número de iteraciones para asentar la capa de pavón sobre la superficie, es importante destacar que es similar al Método 4 en este aspecto, lo que significa que el tiempo necesario es justificado por la calidad y resistencia del acabado. Por otro lado, el Método 3: Químico alcalino es el más rápido de realizar.

5. **Resistencia:** El Método 3: Químico alcalino ha demostrado ser el más resistente en entornos corrosivos y expuestos a condiciones adversas. Por otro lado, el Método 4: Óxido rojo es el que ofrece menos resistencia a la oxidación, mostrando signos de óxido en entornos controlados. Entre el Método 3: Químico alcalino y el Método 2: Clásico en aceite, no hay una diferencia significativa en términos de resistencia. Destaca la resistencia mostrada a la intemperie del Método 1: Ácido comercial.

5.1.2 Método idóneo para ser aplicado en taller naval

Atendiendo a los criterios anteriores, se considera el método idóneo para ser aplicado en los talleres de los buques de la Armada el **Método 3: Pavonado químico alcalino**. Se considera el mejor método de pavonado por varias razones fundamentales:

1. **Estética superior:** Proporciona un acabado estéticamente superior, con un negro brillante que es muy apreciado en comparación con otros métodos que pueden resultar en tonos menos deseables, como el azul del Método 2: Clásico en aceite.
2. **Resistencia excepcional:** Es el método más resistente en entornos corrosivos y expuestos a condiciones climáticas adversas. Esto significa que las piezas tratadas con el Método 3: Químico alcalino tendrán una vida útil más larga y requerirán menos mantenimiento.
3. **Economía viable:** Aunque los precios pueden ser similares entre los métodos, el Método 3: Químico alcalino puede ser más económico en términos de recursos utilizados, ya que, a largo plazo, los ahorros que se conseguirán en mantenimientos rentabilizarán este método.
4. **Facilidad de aplicación:** Aunque se considera difícil de implementar en comparación con algunos otros métodos, como el Método 1: Ácido comercial, el Método 3: Químico alcalino sigue siendo viable y puede ser implementado con éxito en muchos casos.

En resumen, aunque el Método 3 puede ser más difícil de implementar que otros métodos y puede no ser la opción más económica en términos de materiales utilizados, su superioridad en términos de estética y resistencia lo convierten en la mejor opción cuando sea posible. Sin embargo, si no es factible implementar el Método 3: Químico alcalino, se recomienda recurrir al **Método 2: Clásico en aceite**, en casos donde la estética no sea relevante frente a la resistencia, o al **Método 1: Ácido comercial** en casos donde se requiera más estética que resistencia. En ninguno de los casos, se recomienda utilizar el **Método 4: Óxido rojo**.



Figura 5-3. Resultado de los distintos procesos de pavonado según idoneidad (elaboración propia)

5.2 Líneas académicas

Las líneas futuras en el ámbito académico han sido ideadas centradas en el alumnado de la Escuela Naval Militar como principal trabajador. Es por ello por lo que se proponen mejoras para este trabajo que puedan ser aplicadas en futuros trabajos, así como diferentes estudios derivados de este, con el objetivo de seguir indagando en este proceso por pasivación.

5.2.1 Mejoras

Este trabajo, puede servir como base para futuros proyectos que tengan como objeto, estudiar la efectividad del pavonado u otros tratamientos por pasivación contra los efectos de la corrosión. En consecuencia, se plantean posibles mejoras que posibiliten en futuros proyectos, un estudio más preciso sobre las capacidades de estos procesos, que pueda conllevar a una mejor decisión en cuanto a su idoneidad para ser aplicados en la Armada y, al final, encontrar herramientas eficaces que permitan mantener la capacidad operativa de la flota contra los efectos de la corrosión del acero.

Se plantean las siguientes mejoras:

1. **Aproximación a la realidad:** Uno de los problemas que se encontró, fue el hecho de conseguir piezas de acero puras, que no hubieran recibido ningún tipo de tratamiento. Esto se debe a que, el pavonado solo es efectivo sino no existe ningún otro recubrimiento sobre la pieza de acero. Este problema, implicó el hecho de tener que pulir en exceso las piezas de acero utilizadas, originando defectos como se ven en algunas de las muestras a nivel microscópico. Para evitar que estos tratamientos puedan tener defectos debido al estado de las piezas, se plantea la posibilidad de emplear piezas que vayan a ser utilizadas en los buques de guerra, cuyo mantenimiento en estos sea necesario. Así, se podría obtener datos precisos sobre si el proceso objeto de estudio en cuestión, es idóneo para ser aplicado por los miembros de la dotación.
2. **Análisis más preciso:** Otra de las mejoras que se plantean, está relacionada con el proceso de obtención de datos. Durante el período en el que las muestras estuvieron sometidas a los entornos de estrés, se pudo apreciar como estas comenzaban a corroerse, ver Capítulo 4: Resultados. Sin embargo, en el estudio a nivel microscópico se observa como las apariencias engañan, debido a que unas piezas aparentaban no encontrarse oxidadas, cuando en realidad presentaban más óxido que otras. Debido a este asunto y, gracias a la reciente incorporación del CUD de los microscopios portátiles Dino-Lite, se propone el realizar un análisis microscópico de las muestras a lo largo su estancia en los entornos corrosivos así, se obtendrán datos más precisos que conlleven a una mejor decisión final sobre su aplicación en los talleres de los buques.

5.2.2 Líneas futuras

Por otro lado, este estudio puede sentar las bases o servir como referencia para proyectos similares en el marco de aplicación en la Armada. Se plantean los siguientes estudios derivados:

1. **Estudio teórico-práctico de otros procesos por pasivación:** Se plantea estudiar otro método por pasivación, como puede ser el galvanizado. Considerando la amplia gama de métodos de pasivación disponibles, el galvanizado destaca como una opción especialmente prometedora. Su capacidad para crear una capa protectora resistente y duradera lo convierte en un candidato ideal para extender la vida útil del aluminio, un material esencial en numerosas industrias.
2. **Aplicación sobre armas:** Un estudio sobre la aplicación real del pavonado en armas reales o sus componentes es esencial por varias razones. Primero, el pavonado ofrece una protección efectiva contra la corrosión, lo que es crítico para las armas expuestas a

condiciones adversas. Esto prolonga su vida útil y garantiza su funcionalidad a lo largo del tiempo. Además, el pavonado puede mejorar la estética de las armas, lo que es importante tanto para usuarios civiles como militares, ya que proporciona un acabado profesional y pulido. Por último, un estudio de su efectividad en situaciones reales proporcionaría datos concretos sobre su desempeño, lo que es esencial para garantizar la calidad y confiabilidad del pavonado en aplicaciones de defensa y seguridad. En resumen, este estudio contribuiría a mejorar la durabilidad, estética y fiabilidad de las armas, lo que a su vez aumentaría su seguridad y efectividad en el campo.

3. **Restauración de armas o piezas oxidadas:** Por último, un estudio del pavonado en el contexto de la restauración de armas podría proporcionar información útil para otros campos relacionados, como la conservación de objetos metálicos en museos, la restauración de vehículos antiguos y la protección de piezas metálicas en entornos industriales. En resumen, un estudio del pavonado como método de restauración de armas sería una contribución importante para mejorar nuestras prácticas de conservación y restauración, tanto en el ámbito histórico como en el contemporáneo.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. C. Torres y M. del Rey, *De madera y acero: El resurgir de la Armada Española*. Editorial Edaf, S.L., 2013.
- [2] T. Watari, K. Nansai, y K. Nakajima, «Major metals demand, supply, and environmental impacts to 2100: A critical review», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 164, p. 105107, 2021.
- [3] R. V. Caro, «Evolución del acero naval desde la técnica del remachado hasta el AH-36», *Rev. Gen. Mar.*, vol. 270, n.º 5, pp. 679-694, 2016.
- [4] J. Fernández, «España se deja 11 millones en blindar su buque de combate más desprotegido», *elconfidencial.com*. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2021-02-06/lhd-juan-carlos-i_2938591/
- [5] C. Molina Quintana, «Construcción naval: desde la madera hasta los materiales compuestos.», 2021.
- [6] P. R. Roberge y P. Eng, «Corrosion engineering», *Princ. Pract.*, vol. 1, 2005.
- [7] D. Landolt, *Corrosion and surface chemistry of metals*. CRC press, 2007.
- [8] J. R. Davis, *Surface engineering for corrosion and wear resistance*. ASM international, 2001.
- [9] G. Koch, «Cost of corrosion», *Trends Oil Gas Corros. Res. Technol.*, pp. 3-30, 2017.
- [10] «<http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://impact.nace.org/documents/Nace-International-Report.pdf>
- [11] L. Ojaniittu, «Corrosion of cruise vessel outfitting parts», 2019.
- [12] R. V. Caro, «Las corrientes impresas y los sistemas de antiincrustación en los buques», *Rev. Gen. Mar.*, vol. 271, n.º 10, pp. 465-477, 2016.
- [13] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación, 1997.
- [14] «Calderón :: Inicio». Accedido: 12 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/home>
- [15] E. Inox, «Pickling and passivating stainless steel», *Mater. Appl. Ser.*, vol. 4, 2007.
- [16] S. Choukroun, *UF1256 - Planificación, control y ejecución de los procesos de protección, preparación e igualación de superficies*. Editorial Elearning, S.L., 2015.
- [17] E. Puiman, D. Bashlachev, y N. Popok, «Cold Metal Oxidation», 2019.
- [18] «Como hacer un PAVONADO», *Foro de Armas.es*. Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.armas.es/foros/viewtopic.php>
- [19] A. Montiel-García, E. O. Bustamante, y M. L. E. Rincón, «Síntesis y evaluación electroquímica de recubrimientos de magnetita sobre Ti6Al4V-Eli».

- [20] W. Huijbregts y A. Snel, «The protection effectiveness of magnetite layers in relation to boiler corrosion», presentado en 5th International Congress on Metallic Corrosion, 1972.
- [21] S. Ooi, P. Yan, y R. Vegter, «Black oxide coating and its effectiveness on prevention of hydrogen uptake», *Mater. Sci. Technol.*, vol. 35, n.º 1, pp. 12-25, 2019.
- [22] J. Hernández, «Diagrama de Pourbaix: herramienta termodinámica aplicada a los problemas de corrosión.», *Rev. Digit. Investig. Postgrado*, vol. 2, n.º 4, pp. 297-306, 2012.
- [23] R. Raichev, L. Veleva, y B. Valdez, «Corrosión de metales y degradación de materiales», *Editor. UABC*, pp. 155-170, 2009.
- [24] R. L. Aragón, «Tema 11.- Fundamentos de la Corrosión Metálica».
- [25] R. A. Padilla Mosquera y X. R. Sánchez Sánchez, «Estudio de la resistencia a la corrosión dada por las diferentes técnicas de aplicación del tratamiento superficial pavonado».
- [26] «Tratamiento térmico Pavonado», Temples Industriales Alcalá. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.templesindustrialesalcala.es/pavonado/>
- [27] Premier Finishing Inc., «What is black oxide?» [En línea]. Disponible en: http://premierfinishinginc.com/wp-content/uploads/2016/12/Black_Oxide.pdf
- [28] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, *Ciencia e ingeniería de materiales*. Reverté, 2019.
- [29] Z. Fan y S. J. Friedmann, «Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy», *Joule*, vol. 5, n.º 4, pp. 829-862, 2021.
- [30] «Precios de los Futuros de Metales - Investing.com», Investing.com Español. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.investing.com/commodities/metals>
- [31] A. Portal, «Estructuras metalograficas de aleaciones hierro-carbono: aceros al carbono y fundiciones», *Grupo Tecnol. Mecánica Arqueometalurgia Univ. Complut. Madr. Madr.*, 2008.
- [32] D. M. E. Montesinos Rodríguez, «Análisis y Evaluación de la Corrosión en Aceros Navales». 2018 de 2017. [En línea]. Disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/handle/123456789/420>
- [33] La Armada, «D-CP-10: Manual doctrinal de energía y propulsión (CAMBIO 3) (SIN CLASIFICAR), Ministerio de Defensa». 2015.
- [34] La Armada, «D-CP-01 (A): Manual doctrinal de seguridad interior a bordo (CAMBIO 2) (SIN CLASIFICAR). Ministerio de Defensa». 2017.
- [35] A. Momber, «Corrosion and corrosion protection of support structures for offshore wind energy devices (OWEA)», *Mater. Corros.*, vol. 62, n.º 5, pp. 391-404, 2011.
- [36] D. Rodopoulos, T. Gortsas, S. Tsinopoulos, y D. Polyzos, «Boundary element method solution for large scale cathodic protection problems», presentado en IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, IOP Publishing, 2017, p. 012021.
- [37] M. A. J. Mazumder, «Global impact of corrosion: Occurrence, cost and mitigation», *Glob J Eng Sci*, vol. 5, n.º 4, pp. 0-4, 2020.
- [38] Q. Jiang, D. Lu, C. Liu, N. Liu, y B. Hou, «The Pilling-Bedworth ratio of oxides formed from the precipitated phases in magnesium alloys», *Front. Mater.*, vol. 8, p. 761052, 2021.
- [39] Z. Yu, J. Hu, y H. Meng, «A review of recent developments in coating systems for hot-dip galvanized steel», *Front. Mater.*, vol. 7, p. 74, 2020.
- [40] J. I. Jeong *et al.*, «Super anticorrosion of aluminized steel by a controlled Mg supply», *Sci. Rep.*, vol. 8, n.º 1, p. 3760, 2018.
- [41] *REAL ARMERIA DE MADRID. CATALOGO HISTORICO-DESCRIPTIVO*. Editorial MAXTOR, 2008.
- [42] «British Brown Bess 1722 Land Pattern Flintlock Musket Bayonet - Rifle - Replica», eBay. Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ebay.es/itm/281930676766>
- [43] A. S. del Campo, «La Real Armería de Madrid», *Arbor*, vol. 169, n.º 665, pp. 143-161, 2001.
- [44] «La nobleza de las armas», 2023.
- [45] «El arte del poder. La Real Armería y el retrato de corte - Exposición - Museo Nacional del Prado». Accedido: 4 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.museodelprado.es/actualidad/exposicion/el-arte-del-poder-la-real-armeria-y-el-retrato-de/41c17072-f29b-41b5-b0a1-2a7d45d4f8e4>

- [46] A. de Lucas Martínez, D. P. Sánchez, y Á. Alcalde, *La fábrica de armas de Toledo*, vol. 2. Univ de Castilla La Mancha, 1999.
- [47] «Temples industriales», Temples Industriales Alcalá. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.templesindustrialesalcala.es/>
- [48] «www.ttdiaz-maroto.com». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.ttdiaz-maroto.com/>
- [49] Quinta, «ARMERIA EOLICA: RESTAURACION (O RECREACION) DE UNA HURACAN», ARMERIA EOLICA. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armeriaeolica.blogspot.com/2015/09/restauracion-o-recreacion-de-una-huracan.html>
- [50] Quinta, «RESTAURACION POCO AGRESIVA», ARMERIA EOLICA. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armeriaeolica.blogspot.com/2024/>
- [51] «Restauración de Metales Armeria Gostiola». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.armeriagostiola.net/taller/restauracion-de-metales>
- [52] «Restauración de Armas | Armería Martín». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.armeriamartin.es/w/restauracion-de-armas/>
- [53] admin, «Restauración armas», Armeria Nieremberg. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://armerianieremberg.com/taller/restauracion-armas/>
- [54] S. Suresh *et al.*, «Evaluation of corrosion resistance of nano nickel ferrite and magnetite double layer coatings on carbon steel», *Thin Solid Films*, vol. 645, pp. 77-86, 2018.
- [55] I. Dayana *et al.*, «Application of Silica-Coated Magnetite on a Steel Plate and its Frictional and Thermal Effect», *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 65, n.º 1, pp. 76-85, 2021.
- [56] N. J. Kadhim, A. M. Farhan, y H. I. Jaafer, «Anticorrosion behavior of deposited magnetite on galvanized steel in saline water using RF-magnetron sputtering», *Baghdad Sci. J.*, vol. 15, n.º 4, pp. 0406-0406, 2018.
- [57] S. Masadeh, «Corrosion Susceptibility of Blued Steel Reinforcement in Concrete by Electrochemical Impedance Spectroscopy.», *Jordanian J. Eng. Chem. Ind. JJEI*, vol. 6, n.º 3, 2023.
- [58] «https://www.tifoo.de/media/ac/a2/07/1695112312/en_anleitung_02-21.pdf». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.tifoo.de/media/ac/a2/07/1695112312/en_anleitung_02-21.pdf
- [59] «Quick bluing solution “Black Magic” (50 ml)», Tifoo.de. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tifoo.de/en/quick-bluing-solution-black-magic-50-ml-50-ml>
- [60] «Microscopios». Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.dino-lite.eu/es/component/eshop/microscopios?sort_options=b.product_name-ASC
- [61] «Tiempo de Pontevedra en marzo 2024», tiempo3.com. Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tiempo3.com/europe/spain/galicia/pontevedra?page=month&month=March>

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

El presente trabajo de investigación se enfoca en el estudio exhaustivo de diversas técnicas de pavonado con el objetivo de determinar cuál es la más adecuada para su aplicación en talleres de los buques de la Armada. Es importante destacar que este estudio no presenta implicaciones sociales, económicas ni ambientales significativas.

Desde una perspectiva social, el desarrollo de competencias técnicas y científicas asociadas al grado de ingeniería mecánica no genera repercusiones directas en la sociedad en general. Este trabajo se centra en el ámbito técnico y científico, sin involucrar aspectos que puedan impactar la vida cotidiana o la dinámica social.

En términos económicos, la investigación se limita al ámbito académico y no implica gastos significativos ni inversiones de recursos económicos más allá de los necesarios para llevar a cabo el estudio en sí mismo. Además, al tratarse de un trabajo académico, no tiene un objetivo comercial ni busca generar beneficios económicos directos.

Respecto a las implicaciones ambientales, las técnicas de pavonado analizadas en este estudio no implican el uso de productos químicos nocivos ni generan residuos peligrosos en cantidades significativas.

En resumen, este trabajo de investigación se enfoca en el desarrollo de competencias técnicas y científicas asociadas al grado de ingeniería mecánica, sin generar implicaciones sociales, económicas ni ambientales relevantes. Su objetivo principal es contribuir al avance del conocimiento en el campo del pavonado, con especial aplicación en talleres de los buques de la Armada.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El estudio de diferentes técnicas de pavonado para su aplicación en los talleres de los buques de la Armada implica consideraciones técnicas, sino también consideraciones éticas y sociales.

El uso de ciertas sustancias químicas en el pavonado puede plantear preocupaciones sobre la salud y seguridad de los trabajadores. Es importante asegurar que se tomen las medidas adecuadas para proteger la salud de quienes están involucrados en estos procesos, garantizando condiciones de trabajo seguras y saludables.

Otro aspecto relevante es la necesidad de cumplir con normativas y regulaciones en materia de seguridad y calidad. Esto no solo es importante para garantizar la eficacia de los procesos de pavonado, sino también para mantener la integridad de los buques de la Armada y la seguridad de quienes los utilizan.

En resumen, el estudio de técnicas de pavonado para su aplicación en talleres de la Armada no solo implica consideraciones técnicas, sino reflexiones éticas, de salud y seguridad.

ANEXO III: RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE PAVONADO

PASOS	MÉTODO 1: PAVONADO EN ÁCIDO COMERCIAL	MÉTODO 2: PAVONADO CLÁSICO EN ACEITE	MÉTODO 3: PAVONADO QUÍMICO ALCALINO	MÉTODO 4: PAVONADO EN ÓXIDO ROJO
1	Desengrasar completamente el metal utilizando acetona u otro desengrasante.	Eliminar completamente cualquier rastro de óxido de las piezas a tratar con una lija o pulidora.	Asegurarse de que las piezas a pavonar estén completamente pulidas y libres de cualquier residuo de grasa o suciedad.	Verificar que las piezas estén meticulosamente pulidas y libres de grasa o suciedad antes de iniciar el proceso de pavonado.
2	Lijar el metal con una lija fina (400+800) o pulidora para eliminar pavonado antiguo y óxido, dejando el metal blanco sin rastros de oxidación.	Limpiar las piezas una vez que estén libres de óxido.	Limpiar las piezas a fondo con acetona para garantizar una superficie limpia, utilizando guantes de látex para evitar la contaminación de la superficie con grasa de la piel.	Realizar una limpieza exhaustiva con acetona para asegurar una superficie impecable antes de proceder con el pavonado.
3	Aplicar nuevamente el desengrasante evitando tocar el metal con los dedos.	Atar las piezas con alambre o sujetarlas con pinzas de acero inoxidable para facilitar su manipulación durante el proceso de pavonado.	Agregar agua(1L), destilada preferiblemente, al recipiente de acero inox y luego añadir la sosa cáustica (1 kg) y el nitrato de potasio (330 g), mezclándolos hasta que estén bien integrados. La temperatura óptima para el proceso es de $150 \pm 10^{\circ}\text{C}$	Introducir las piezas en vinagre durante aproximadamente 5 minutos para activar la reacción química y preparar la superficie del metal para la formación del óxido rojo.
4	Empapar una brocha con líquido pavonador Ballistol® y aplicarlo uniformemente sobre las piezas, evitando la contaminación con otras superficies.	Seleccionar el aceite adecuado para el pavonado, que puede ser aceite usado, de motor de coche, aceite de cocina como el de oliva o girasol, o aceites específicamente	Introducir las piezas en el recipiente asegurándose de que no toquen el fondo ni los laterales para garantizar un pavonado uniforme, y dejar que permanezcan en la mezcla durante unos 20/25 minutos,	Preparar una solución saturada de agua oxigenada con sal común y calentarla suavemente sin que llegue a hervir.

		diseñados para pavonar.	ajustando el tiempo si es necesario para obtener una tonalidad uniforme.	
5	Acelerar el secado utilizando una pistola de calor una vez aplicado el líquido pavonador.	Calentar las piezas de acero a pavonar utilizando un soplete de butano hasta alcanzar una temperatura de 300 °C, lo que hace que la pieza adquiera un tono azulado sin llegar a ponerse roja.	Una vez pasado el tiempo, esperar a que la mezcla de pavonado adquiera la misma temperatura que el agua hirviendo antes de retirar las piezas para evitar la formación de óxido de hierro nuevamente.	Aplicar la mezcla sobre la pieza metálica de manera uniforme, permitiendo que la pieza adquiera un tono oxidado a medida que la mezcla actúa sobre el metal.
6	Remover los excedentes de óxido sobre la superficie de la pieza utilizando lana de acero empapada en isopropanol.	Sumergir las piezas calientes en aceite caliente y mantenerlas sumergidas hasta que se enfríen completamente, lo que permite que adquieran el característico tono negro del pavonado.	Retirar las piezas del recipiente de pavonado y sumergirlas en agua hirviendo durante unos 10 minutos para eliminar los restos de los ingredientes.	Ayudar al secado con una pistola de calor a baja temperatura y repetir este paso y el anterior dos veces.
7	Repetir hasta seis veces el proceso de aplicación del líquido pavonador, secado y remoción de excedentes con isopropanol para obtener un tono más oscuro.	Sacar las piezas del aceite una vez enfriadas por completo y limpiar el exceso de aceite con un trapo.	Limpiar las piezas, sumergirlas en aceite y dejar que las piezas reposen durante una noche o medio día para completar el proceso.	Limpiar ligeramente las piezas de acero con un trapo para remover excedentes de óxido y luego introducirlas en agua hirviendo, preferiblemente destilada, durante aproximadamente 5 minutos para transformar el óxido de hierro en magnetita.
8	Lubricar el metal pavonado al finalizar y dejar reposar durante al menos 24 horas en aceite para que el	Verificar que las piezas tengan un color azul/negro oscuro uniforme en toda la superficie después de limpiarlas, lo que	El resultado final es un pavonado de tonalidad negra brillante y duradero.	Repetir los pasos anteriores (5-6-7) entre 4 y 5 veces para construir gradualmente la capa de pavonado en

	pavonado se cure completamente.	indica un pavonado exitoso		la superficie del metal.
9	Es crucial repetir la secuencia un mínimo de 6 veces y dejar asentarse la capa de pavonado sobre la pieza en aceite durante al menos 24 horas para evitar que el pavonado se oxide nuevamente, perdiendo sus propiedades estéticas y de protección contra la oxidación	Repetir el proceso tantas veces como sea necesario si hay áreas con un color diferente o más claro, lo que suele requerir de 2 a 3 repeticiones del proceso (Pasos 5-6-7).		Hervir las piezas de acero en agua destilada durante 20 minutos una vez finalizadas las 5 iteraciones para sellar el pavonado y mejorar su durabilidad.
10				Secar completamente las piezas, remover los excedentes de óxido y dejarlas reposar en aceite SAE90 durante al menos 24 horas para proporcionar una capa adicional de protección y mejorar su acabado final.

Tabla A3-1. Resumen de los métodos de pavonado (elaboración propia)