

Influencia de los tratamientos de preprocesado de piezas en Pulvimetalurgia para la aplicación de recubrimientos anticorrosión base Zn

Influence of Pre-Processing Treatments on Powder Metallurgy Components for the Application of Zinc-Based Anticorrosion Coatings

María Covadonga Soto Pérez^a, Jose Sicre-Artalejo^a

^aPMG Powertrain R&D Center S.L.U. Pol Ind. Vega de Baíña s/n 33682-Mieres. España.

(Covadonga.SotoPerez@pmgsinter.com; jose.sicre@pmgsinter.com)

How to cite: Soto Pérez M. C. y Sicre-Artalejo, J. (2025). Influencia de los tratamientos de preprocesado de piezas en Pulvimetalurgia para la aplicación de recubrimientos anticorrosión base Zn. En libro de actas: *Libro de actas del IX Congreso Nacional de Pulvimetalurgia (IV Iberoamericano) CEIPM2025*. Valencia, 16-18 de Junio de 2025. <https://doi.org/10.4995/CEIPM2025.2025.21101>

Abstract

Around us, many materials are coated to protect them against corrosion and increase their durability. However, parts manufactured by powder metallurgy (PM) present a particular challenge due to the presence of surface pores, which functions as preferential sites for the initiation of corrosive processes. To ensure an effective anti-corrosion coating, appropriate pre-treatment is essential to seal these pores and prepare the surface. This study analyzes different pre-treatment methods, such as shot blasting, impregnation, the combination of both (impregnation + shot blasting), as well as a steam treatment. These techniques aim to optimize the surface quality of the substrate and promote better adhesion of the final coating.

Keywords: Powder metallurgy; Pre-treatment; Impregnation; Shot blasting; Steam treatment; Pores; Anti-corrosion coatings; Coating adhesion.

Resumen

A nuestro alrededor, muchos materiales están recubiertos para protegerlos contra la corrosión y aumentar su durabilidad. Sin embargo, las piezas fabricadas mediante pulvimetalurgia (PM) suponen un desafío particular debido a la presencia de poros superficiales, los cuales actúan como puntos preferentes para el inicio de procesos

corrosivos. Para garantizar la eficacia de un recubrimiento anticorrosión, es fundamental realizar un preprocesado adecuado que selle estos poros y prepare la superficie del material. En este trabajo se estudian distintos tratamientos previos, como el granallado, la impregnación, la combinación de ambos (impregnación + granallado), así como un tratamiento al vapor. Estas técnicas buscan optimizar la calidad superficial del sustrato, para favorecer una mejor adherencia del recubrimiento final.

Palabras clave: *Pulvimetalurgia; Preprocesado; Impregnación; Granallado; Tratamiento al vapor; Poros; Recubrimientos anticorrosión; Adherencia de recubrimientos.*

1. Introducción

Los recubrimientos metálicos desempeñan un papel esencial en la protección contra la corrosión, extendiendo la vida útil de los componentes metálicos. Los recubrimientos base zinc (Zn), particularmente las aleaciones ZnNi, son ampliamente utilizados debido a su capacidad para ofrecer protección catódica y actuar como barrera frente a agentes corrosivos [1,2]. Estos recubrimientos suelen aplicarse con espesores típicos que varían entre 5 y 12 micras, dependiendo del método y la aplicación final. Son especialmente efectivos en ambientes industriales y marinos, donde la exposición a humedad, sales y agentes químicos es alta, proporcionando protección efectiva durante largos períodos de servicio. Las rutas de deposición consideradas en este trabajo se limitan al zincado a tambor de una aleación de zinc-níquel, un proceso en frío mediante electrodeposición que ofrece ventajas en cuanto a adherencia y control de espesor.

No obstante, cuando se trata de componentes fabricados mediante pulvimetalurgia (PM), la eficacia de estos recubrimientos puede verse comprometida. La presencia de poros superficiales incrementa la susceptibilidad a la oxidación y, en general, dificulta la adherencia del recubrimiento, disminuyendo su efectividad protectora. Aunque en algunos casos los poros pueden actuar como puntos de anclaje que mejoran la adherencia mecánica, la porosidad abierta suele facilitar la entrada de agentes corrosivos. Por ello, es necesario realizar un preprocesado que acondicione adecuadamente la superficie del sustrato para optimizar la adherencia y la protección anticorrosiva del recubrimiento.

Esta investigación está orientada a desarrollar soluciones viables para superar las limitaciones impuestas por la porosidad superficial de los materiales pulvimetalúrgicos.

2. Objetivos

El objetivo de este estudio es analizar las ventajas y desventajas de distintos tratamientos de preprocesado, con el fin de diseñar un método adecuado para piezas PM previo a la aplicación de recubrimientos anticorrosión base Zn, optimizando las condiciones superficiales para asegurar una buena adherencia y efectividad del recubrimiento.

3. Desarrollo de la innovación

3.1. Materiales base

Se emplearon piezas obtenidas por PM fabricadas con polvo de hierro prealeado, obtenido mediante atomización por agua. Las muestras se compactaron en frío, aplicando una presión de compactación de 600 MPa, alcanzando una densidad en verde de $6,9 \text{ g/cm}^3$ y se sinterizaron a 1120°C durante 30 minutos en atmósfera reductora $\text{N}_2\text{-H}_2$, (aproximadamente 90% N_2 y 10% H_2), para asegurar la cohesión entre las partículas y minimizar la oxidación.

3.2. Tipos de preprocesado analizados

A lo largo de toda la investigación se analizaron 4 grupos de piezas en función del pretratamiento aplicado:

3.2.1. Sinterizado + granallado (SG)

Este grupo de piezas integra procesos secuenciales de sinterizado y granallado como etapas previas al recubrimiento. El granallado se realizó con partículas de acero inoxidable de tamaño promedio entre 0.3 y 0.6 mm, aplicadas a una presión de 5 bar, con un flujo continuo durante 3 minutos. Este tratamiento contribuye al cierre parcial de los poros superficiales y genera una rugosidad controlada que favorece la adherencia del recubrimiento aplicado posteriormente.

3.2.2. Sinterizado + impregnado (SI)

Tratamiento de impregnación con resinas epóxicas de baja viscosidad, que penetran en la red porosa durante 15 minutos a temperatura ambiente. Posteriormente, las piezas se curan a 80°C durante 1 hora para asegurar el sellado efectivo de los poros y generar una capa superficial homogénea que mejora la adhesión del recubrimiento.

3.2.3. Sinterizado + impregnado + granallado (SIG)

Combinación secuencial de sinterizado, impregnación y granallado. La impregnación sella poros según las condiciones antes descritas, y el granallado se realiza bajo las mismas condiciones que en el apartado SG, aumentando la rugosidad y optimizando la calidad superficial y la adherencia del recubrimiento.

3.2.4. Sinterizado + tratamiento al vapor (STV)

El tratamiento al vapor tiene como principal objetivo cerrar los poros. Este proceso aprovecha la reacción del hierro con el vapor de agua a altas temperaturas (entre 300 °C y 600 °C), en condiciones controladas para generar una capa de óxido de hierro, en este caso magnetita (Fe_3O_4). Esta capa ayuda a cerrar los poros superficiales.

3.3. Aplicación del recubrimiento base Zn

Se aplicó un recubrimiento electrolítico de aleación ZnNi mediante un proceso en tambor, utilizando un baño ácido con acabado gris, libre de cromo hexavalente (Cr VI). Este tipo de recubrimiento es ampliamente utilizado por su resistencia a ambientes salinos y su estabilidad térmica de hasta 300 °C. El proceso se realizó a una temperatura de 50 °C, con una densidad de corriente de 5 A/dm² y un tiempo de deposición ajustado para alcanzar espesores entre 5 y 12 µm, según el grupo de tratamiento previo. La rotación controlada del tambor permitió una cobertura uniforme en todas las piezas. La aleación ZnNi utilizada contenía aproximadamente un 12-15% de níquel, lo que proporciona una protección catódica eficaz y buena adherencia sobre sustratos tratados.

3.4. Caracterización de las muestras

Con el objetivo de evaluar el efecto de los distintos tratamientos de preprocesado y la calidad del recubrimiento aplicado, se llevaron a cabo diversas técnicas de caracterización sobre las piezas obtenidas.

- **Microscopía óptica (LOM):** Se utilizó un equipo Leica con software LAS X (Leica Application Suite X) para el análisis de cortes transversales. Las muestras fueron embebidas, pulidas y atacadas según los procedimientos estándar para materiales sinterizados. Esta técnica permitió evaluar el estado superficial antes del recubrimiento, la presencia de poros remanentes y el espesor de capas de óxidos y recubrimientos.

- **Microscopía electrónica de barrido (SEM):** Se utilizó para el análisis morfológico de la superficie y la interfaz entre el recubrimiento y el sustrato. Las observaciones permitieron identificar zonas de defectos, discontinuidades, así como el grado de adherencia del recubrimiento.
- **Ensayos de corrosión en cámara salina:** Se realizaron según la norma ISO 9227, sometiendo las muestras a niebla salina neutra (NSS) durante un tiempo determinado para evaluar la resistencia a la corrosión del recubrimiento ZnNi. Se registraron el tipo, tiempo de aparición y extensión de los productos de corrosión en cada muestra.
- **Medición de espesores:** Tanto la capa de óxido generada por el tratamiento al vapor como el recubrimiento ZnNi se midieron directamente sobre cortes metalográficos mediante LOM y SEM.
- **Selección de muestras:** Para cada grupo de tratamiento, se seleccionaron cinco piezas representativas con el fin de asegurar la repetibilidad y representatividad de los resultados.

4. Resultados

4.1. Análisis superficial tras preprocesado

Con el objetivo de caracterizar la superficie inicial antes de la aplicación del recubrimiento, se prepararon cortes transversales metalográficos en cinco piezas representativas de cada grupo de tratamiento. El análisis se llevó a cabo mediante microscopía óptica utilizando un microscopio Leica DM2700 M, con el software asociado LAS X (Leica Application Suite X). Se trabajó con aumentos entre 2.5× y 100×, dependiendo del detalle requerido. Aunque se tomaron múltiples imágenes a lo largo del perímetro de cada muestra para el análisis, en este trabajo se presenta una imagen representativa por grupo, seleccionada a modo de ejemplo, con el objetivo de sintetizar la información visual sin comprometer la interpretación general de los resultados.

4.1.1. Sinterizado + granallado (SG)

La fig.1 – (a) evidencia que el granallado logra cerrar los poros por completo, resultando en una superficie sin porosidad visible. Sin embargo, esta superficie presenta un aspecto irregular en comparación con una superficie lisa.

4.1.2. Sinterizado + impregnado (SI)

La fig.1 – (b) se aprecia la superficie tras el proceso de impregnación. Aunque se ha aplicado el tratamiento, aún son visibles varios poros superficiales, lo que indica una cobertura incompleta en ciertas zonas.

4.1.3. Sinterizado + tratamiento al vapor (STV)

La fig.1 – (c) muestra la superficie de una pieza tras el tratamiento al vapor. Se observa una capa de óxido de hierro, principalmente magnetita (Fe_3O_4), con un espesor aproximado de 5 μm . Esta capa recubre parcialmente los poros, contribuyendo al sellado superficial.

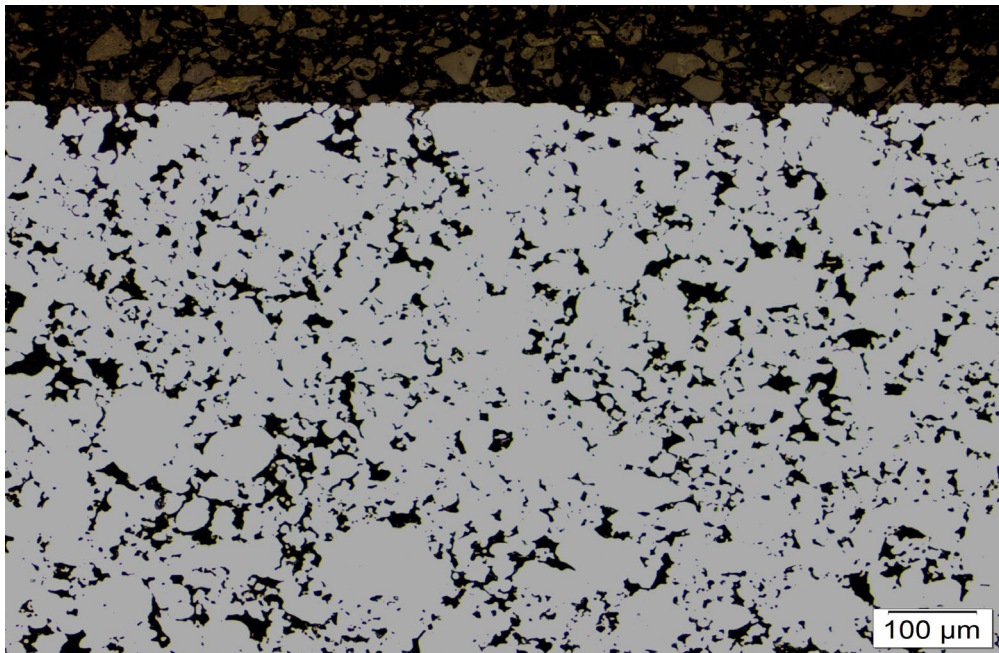


Fig. 1 Micrografía LOM Superficie pieza antes de cada uno de los pretratamientos

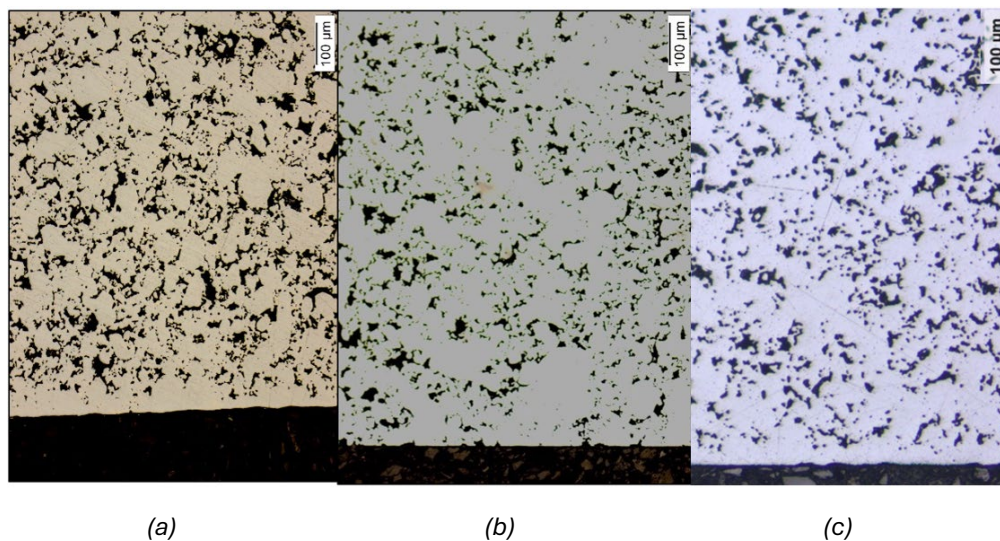


Fig. 2 Micrografía LOM (a) Sinterizado + granallado (SG) (b) Sinterizado + impregnado (SI) (c) Sinterizado + tratamiento al vapor (STV).

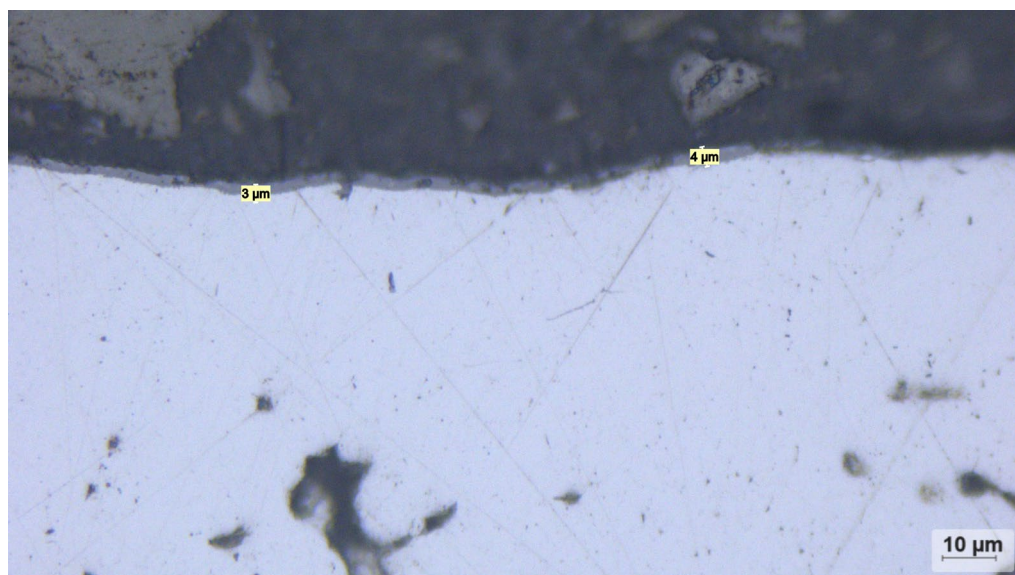


Fig. 3 Micrografía LOM (c) Sinterizado + tratamiento al vapor (STV) a mayor magnificación para observar el efecto del tratamiento al vapor (3-4 µ espesor).

4.2. Evaluación de la superficie tras el recubrimiento Zn

Tras la aplicación del recubrimiento de ZnNi, se analizaron otras 5 piezas de cada familia. Para ello, se prepararon cortes transversales de las muestras con el fin de evaluar el espesor y la adherencia del recubrimiento, utilizando microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de dispersión de energía (EDS), con los equipos Tescan Vega2 y Oxford 50 Max respectivamente.

4.2.1. Sinterizado + granallado (SG)

En este grupo de piezas se observó una superficie que resultó irregular por efecto del granallado. El recubrimiento mostró buena adherencia general, aunque en algunas zonas puntuales se detectó la posible presencia de un pequeño espacio entre el recubrimiento y el sustrato, lo que podría reflejar una ligera pérdida de adherencia localizada.

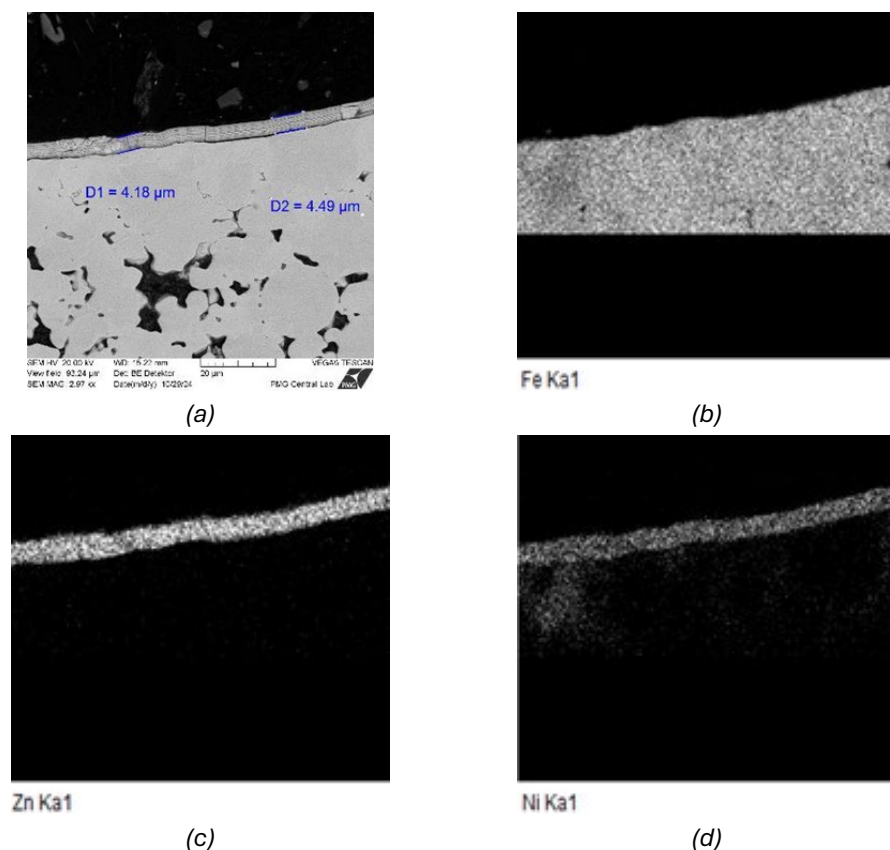


Fig. 4 Análisis SEM grupo SG: (a) Sustrato + recubrimiento ZnNi (b) Sustrato pieza (c) Recubrimiento ZnNi contenido en Zn (d) Recubrimiento ZnNi contenido en Ni

4.2.2. Sinterizado + impregnado (SI)

El recubrimiento aplicado a este lote logró penetrar en la red de poros, obteniéndose una cobertura continua y uniforme a lo largo de la superficie.

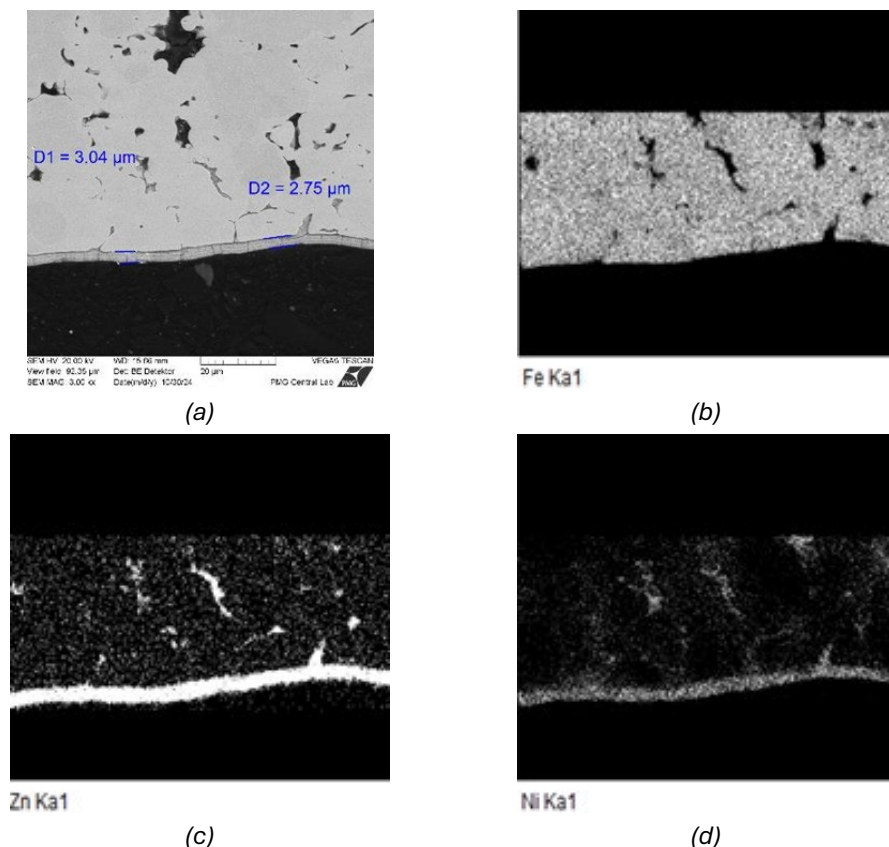


Fig. 5 *Análisis SEM grupo SI: (a) Sustrato + recubrimiento ZnNi (b) Sustrato pieza (c) Recubrimiento ZnNi contenido en Zn (d) Recubrimiento ZnNi contenido en Ni*

4.2.3. Sinterizado + impregnado + granallado (SIG)

En este caso, se observa una rugosidad notable, generada por el granallado. Esta textura favoreció una adherencia adecuada del recubrimiento, manteniendo también una distribución homogénea del espesor.

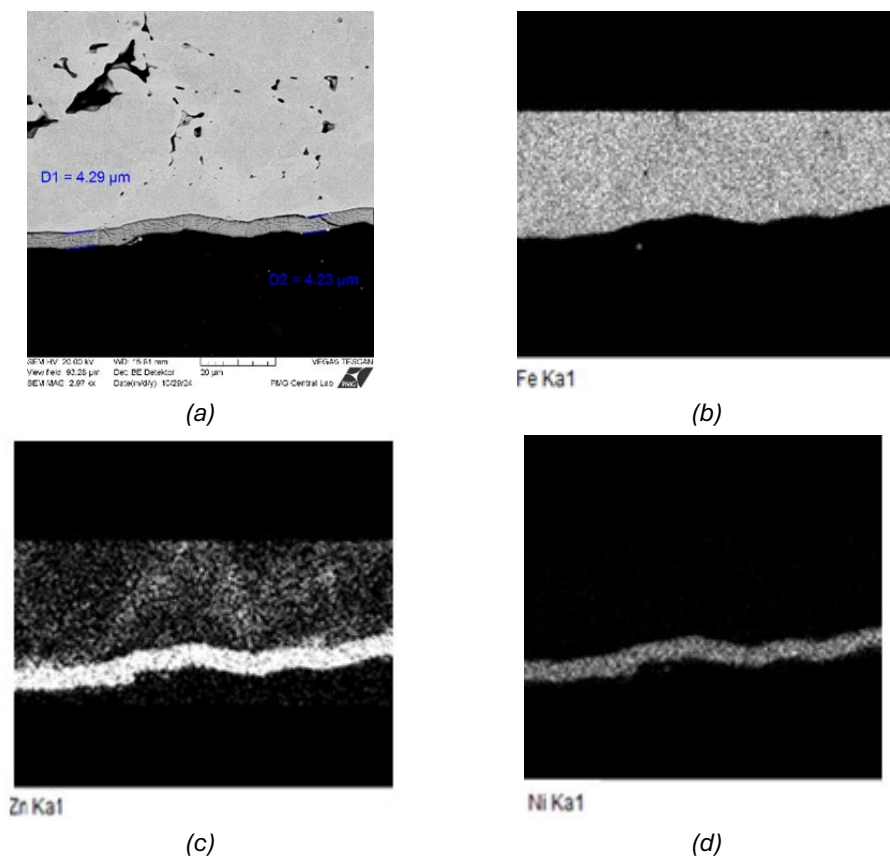


Fig. 6 Análisis SEM grupo SIG: (a) Sustrato + recubrimiento ZnNi (b) Sustrato pieza (c) Recubrimiento ZnNi contenido en Zn (d) Recubrimiento ZnNi contenido en Ni

4.2.4. Sinterizado + tratamiento al vapor (STV)

Este último grupo de piezas fue descartado tras este paso del análisis, debido a la aparición de burbujas en la superficie, indicativas de una mala adhesión del recubrimiento. Además, se detectó la presencia de óxido rojo, señal de una protección superficial deficiente frente a la corrosión.

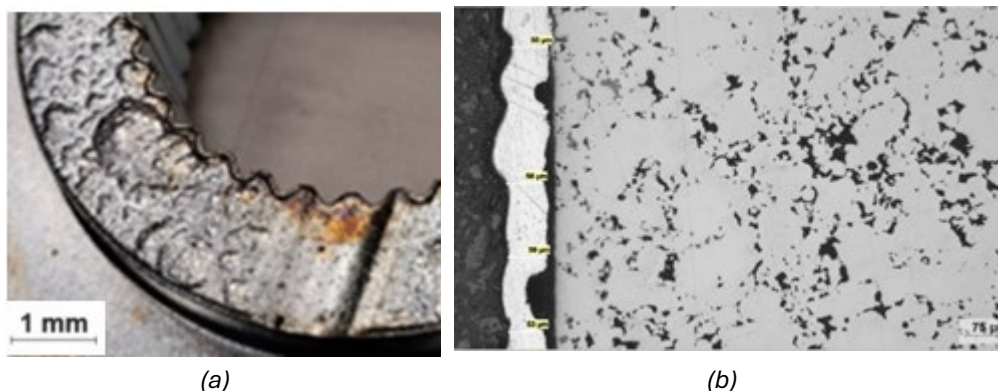


Fig. 7 (a) Grupo STV: Aspecto superficial tras recubrimiento. (b) Micrografía LOM recubrimiento sin adherencia

4.3. Ensayo de cámara salina.

Para analizar el comportamiento de los recubrimientos se realizó un ensayo de niebla salina, conforme a la norma UNE-EN ISO 9227 [3]. “*Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayo de niebla salina*”. Se ensayaron 3 piezas representativas de cada grupo, colocadas en la cámara en posición horizontal. La temperatura en el interior de la cámara se mantuvo constante a 35°C durante todo el ensayo y el pH inicial de la solución se ajustó de acuerdo con los requisitos de la norma.

La evaluación de las muestras se llevó a cabo según la norma UNE-EN ISO 10289 [4]. “*Métodos de ensayo de corrosión de recubrimientos metálicos y no orgánicos sobre sustratos metálicos. Clasificación de probetas y piezas de protección sometidas a ensayos de corrosión*” En esta norma define dos parámetros clave:

- R_p : Grado de protección frente a la corrosión del metal base (presencia de óxido rojo).
- R_a : Clasificación del aspecto del recubrimiento en relación con su deterioro (presencia de óxido blanco).

Ambos parámetros se expresan mediante un valor numérico que indica el nivel de degradación observado.

Las evaluaciones se realizaron tras intervalos de exposición de 24 – 72 – 144 – 240 – 480 – 720 horas.

Se observa que el grupo de piezas sinterizado + granallado y sinterizado + impregnado + granallado presentan un comportamiento estable, manteniendo valores cercanos a $R_a = 10$ incluso tras 720 horas de exposición, lo que indica una excelente resistencia del recubrimiento frente al ambiente salino.

En cambio, el lote de piezas sinterizado + impregnado evidencia una ligera pérdida de R_a en las últimas etapas del ensayo, con la aparición de un punto rojo que sugiere una leve degradación localizada del recubrimiento. Aunque su comportamiento general es aceptable, se encuentra por debajo de las otras dos combinaciones en cuanto a protección superficial.

Tabla 1. Resultados ensayo cámara salina

TIEMPO DE EVALUACIÓN (Ra/Rp)							
Grupo	Nº Pieza	24h	72h	144h	240h	480h	720h
SG	1	10/Picaduras en bordes	10/8	10/8	10/7	10/0	10/0
	2	10/10	10/8	10/8	10/6	10/0	10/0
	3	10/Picaduras en bordes	10/9	10/8	10/6	10/0	10/0
SI	1	10/Neblina	10/Neblina	10/8	10/8	10/1	10/0
	2	10/Neblina	10/Neblina	10/Neblina	10/7	10/1	10/0 (Picadura corrosión roja)
	3	10/10	10/Neblina	10/Neblina	10/9	10/2	10/0
SIG	1	10/10	10/Neblina	10/Neblina	10/7	10/1	10/0
	2	10/10	10/Neblina	10/9	10/7	10/1	10/0
	3	10/10	10/Neblina	10/9	10/7	10/1	10/0

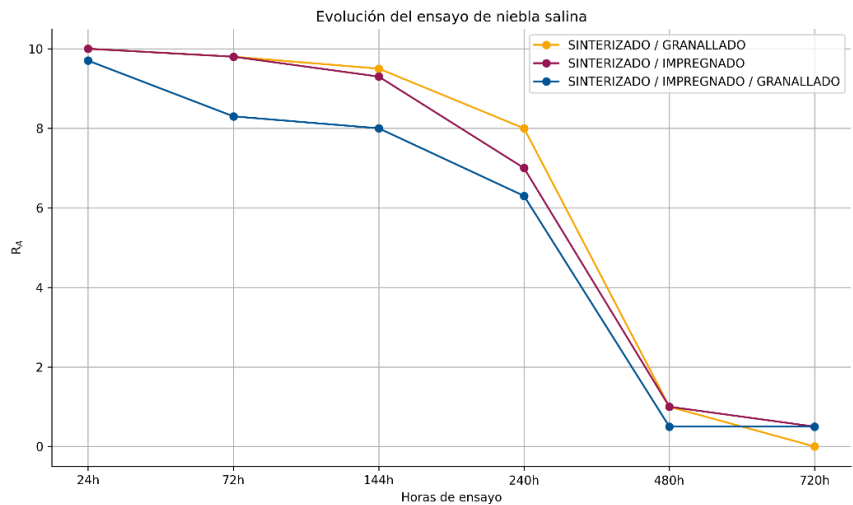


Gráfico. 1 Evolución ensayo cámara salina

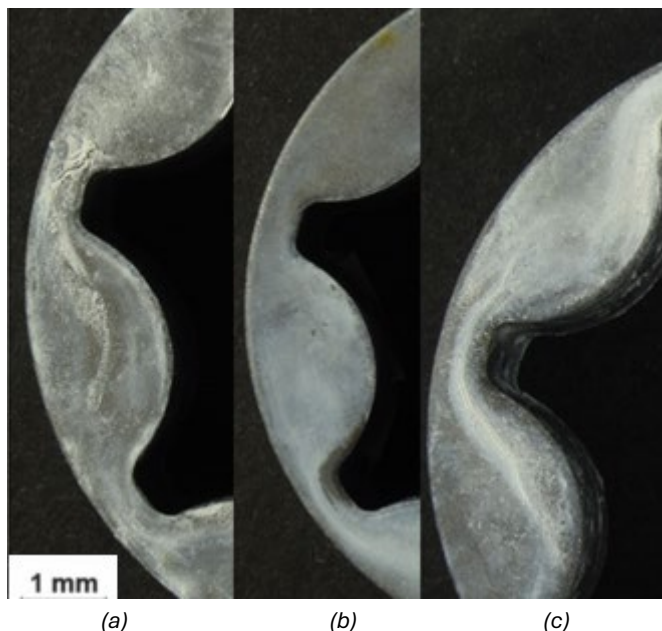


Fig. 8 Aspecto superficial tras 720h cámara salina (a) Sinterizado + granallado (SG) (b) Sinterizado + impregnado (SI) (c) Sinterizado + impregnado + granallado

5. Conclusiones

Tras el estudio del comportamiento ante una atmosfera salina de piezas pretratadas con diferentes técnicas se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El tratamiento combinado de impregnación y granallado demostró ser el más eficaz al ofrecer simultáneamente un buen sellado de la porosidad (gracias a la impregnación) y una rugosidad superficial favorable para el anclaje mecánico del recubrimiento (producto del granallado). Los análisis mediante SEM y los resultados del ensayo en cámara salina confirmaron una adherencia mejorada y una mayor resistencia a la corrosión respecto a los otros grupos analizados.
- El tratamiento al vapor evidenció problemas de adherencia, atribuibles a la presencia de una capa de óxido superficial (magnetita) que no proporcionó una base adecuada para el anclaje del recubrimiento ZnNi.

- La rugosidad superficial inducida por el granallado favorece el anclaje mecánico del recubrimiento, aunque requiere un adecuado sellado previo para evitar penetración de agentes corrosivos en piezas PM.

Los resultados de esta investigación son especialmente relevantes para sectores como la industria automotriz, donde la durabilidad y resistencia a la corrosión son requisitos críticos. La implementación adecuada de un tratamiento superficial combinado puede traducirse en una mejora significativa de la vida útil de componentes PM recubiertos.

Finalmente, al considerar la traslación al sector productivo, resulta clave evaluar no solo la eficacia técnica, sino también el balance económico de cada tratamiento. Si bien la impregnación y el granallado implican un mayor coste inicial frente a técnicas más simples, la reducción de fallos prematuros y el alargamiento de la vida útil de los componentes puede generar un ahorro global en mantenimiento, reposición y garantías.

6. Referencias

- [1] Etaat, M., Emamy, M., Mohammadi, M. Gh., & Fadaei, E. (2009). Surface treatment and nickel plating of iron powder metallurgy parts for corrosion protection. *Materials & Design*, 30(10), 3560–3565.
- [2] Wang, Y., Zhang, L., & Li, J. (2014). Electrodeposition of Zn–Ni alloy coatings on porous sintered steel: Effect of porosity and surface treatments. *Surface Engineering*, 30(10), 707–714.
- [3] Tang, C., Liu, Z., & Hu, Y. (2016). Influence of steam treatment on corrosion resistance of sintered iron. *Materials & Design*, 92, 1012–1019.
- [4] Díaz, E., Pérez, A., & Romero, L. (2018). Effect of epoxy impregnation on corrosion behavior of PM steel parts. *Powder Metallurgy*, 61(3), 205–213.
- [5] Palanivelu, R., et al. (2020). Corrosion behaviour of Zn–Ni alloy coatings: A comparative study using salt spray and electrochemical tests. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 9395–9404.
- [6] Holzapfel Group. (2018). *Holzapfel's Sinter Surface Solutions enables zinc-nickel plating of PM automotive components*.
- [7] UNE-EN ISO 9227: Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayo de niebla salina.
- [8] UNE-EN ISO 10289: Clasificación de recubrimientos metálicos y no orgánicos frente a la corrosión.