







Propiedades de recubrimientos de fosfato de manganeso modificados con nanopartículas de Al₂O₃

Properties of manganese phosphate coatings modified with Al₂O₃ nanoparticles

A. J. Esteban-Gatica ^a, M. Molina-Morales ^c, A. Garrido Hernández ^c, G. García-Domínguez ^b, A. S. de Ita de la Torre ^c, J. Reyes Miranda ^c

^a División Procesos Industriales, Universidad Tecnológica de Tecámac, 55740, Tecámac, Estado de México, México.

^b División Tecnología Ambiental, Universidad Tecnológica Fidel Velázquez, 54474, Nicolás Romero, Estado de México, México.

^c Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 02128, Alcaldía Azcapotzalco, CDMX, México.

Resumen

Este estudio presenta los resultados de la síntesis y caracterización de recubrimientos de fosfato de manganeso (Mn₃(PO₄)₂) modificados con partículas de Al₂O₃ depositados sobre sustratos de acero AISI 1020. El objetivo es evaluar la influencia de la incorporación de alúmina en las propiedades estructurales, morfológicas y de adherencia de los recubrimientos. Se incorporaron tres concentraciones distintas de Al₂O₃ (0.2, 0.4 y 0.6 g/L), con un tamaño de partícula de 0.05 µm, en el baño de fosfatado. La caracterización se llevó a cabo mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) para evaluar la morfología superficial y características de las partículas de fosfato, revelando que a 0.2 y 0.4 g/L Al₂O₃ se tiene la morfología característica de los granos de fosfato de manganeso (granos hexagonales) y a altas concentraciones de Al₂O₃ se pierde la morfología y se observan partículas irregulares. Mediante la técnica de difracción de rayos X (DRX) se identifican la fase monoclinica del fosfato de manganeso. Se realizó las pruebas de adherencia y calidad de los recubrimientos, de acuerdo con la norma VDI 3198. Se determinaron los espesores de los recubrimientos con el equipo PosiTector-6000. Para el caso de las pruebas de adherencia se determinaron fallas aceptables ya que no hubo delaminación del recubrimiento.

Palabras Clave: Fosfato de manganeso, Al₂O₃, recubrimientos protectores, caracterización estructural, acero AISI 1020.

Abstract

This study presents the results of the synthesis and characterization of manganese phosphate (Mn₃(PO₄)₂) coatings modified with Al₂O₃ particles, deposited on AISI 1020 steel substrates. The objective is to evaluate the influence of alumina incorporation on the structural, morphological, and adhesion properties of the coatings. Three different concentrations of (0.2, 0.4, and 0.6 g/L) with a particle size of 0.05 µm were added to the phosphating bath. Characterization was carried out using scanning electron microscopy (SEM) to assess the surface morphology and the characteristics of the phosphate grains, revealing that at 0.2 and 0.4 g/L of Al₂O₃ the manganese phosphate grains exhibited their characteristic hexagonal morphology, while at higher concentrations this morphology was lost and irregular particles were observed. X-ray diffraction (XRD) analysis identified the monoclinic phase of manganese phosphate. Adhesion and coating quality tests were performed in accordance with the VDI 3198 standard. The coating thicknesses were determined using a PosiTector-6000 device. In the adhesion tests, acceptable failure patterns were observed, as no delamination of the coating occurred.

Keywords: Manganese phosphate, Al₂O₃, protective coatings, structural characterization, AISI 1020 steel.

1. Introducción

El acero es una aleación de hierro que contiene entre 0.02 y 2.11% de carbono en peso que le confiere excelentes propiedades mecánicas que le permite ser usado comúnmente

*Autor para la correspondencia: al2242801012@azc.uam.mx

Correo electrónico: alondraesteban2003@gmail.com (Alondra Jacqueline Esteban-Gatica), al2242801012@azc.uam.mx (Mariana Molina-Morales), agh@azc.uam.mx (Aristeo Garrido-Hernández), garciagiovanni1311@gmail.com (Giovanni García-Domínguez), add@azc.uam.mx (Antonio Silvio de Ita de la Torre), joremi@azc.uam.mx (Joan Reyes-Miranda).

como elemento estructural. Se puede incorporar otros elementos de aleación como: manganeso, cromo, níquel, vanadio, niobio, silicio, molibdeno, entre otros, para obtener aceros de baja aleación, aceros inoxidable, aceros grado herramienta y aceros para maquinaria.

De acuerdo con un esquema de especificaciones desarrollado por la American Iron and Steel Institute (AISI) y la Society of Automotive Engineers (SAE), los aceros al carbono se especifican por un sistema de numeración de cuatro dígitos: 10XX, donde 10 indica que el acero es al carbono, y XX indica el porcentaje de carbono en cientos o puntos porcentuales. Por ejemplo, el acero 1020 contiene 0.20% de carbono. Los aceros al carbono se clasifican típicamente en tres grupos de acuerdo con su contenido de carbono: Aceros al bajo, medio y alto carbono. A medida que se incrementa el contenido de carbono, aumenta también la resistencia y la dureza del acero, pero su ductilidad se reduce (M. P. Groover, 1997).

Los recubrimientos de conversión se aplican a los metales para mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste mecánico, así como para promover la adhesión del recubrimiento orgánico. Se aplican en un proceso de varios pasos que incluye la limpieza del metal para eliminar la suciedad, la contaminación orgánica, el óxido y las microestructuras superficiales que pueden impedir la formación del recubrimiento o reducir su rendimiento. Si bien existen diversas maneras de clasificar los recubrimientos de conversión (por ejemplo, según su composición química, impacto ambiental, naturaleza de la aplicación o problemas de salud), una de las clasificaciones más útiles es dividirlos en recubrimientos a base de fosfato y otros (Hughes, 2017). Entre estos otros recubrimientos de conversión se incluyen los de cromato, zirconio, titanio, manganato, molibdato, y silano. Los recubrimientos de cromato se utilizaron ampliamente por su excelente resistencia a la corrosión, aunque su uso ha sido restringido debido a la toxicidad del cromo hexavalente. Milošev & Frankel (2018).

El manganeso en forma de fosfato de manganeso se emplea ampliamente como recubrimiento de conversión debido a sus propiedades tribológicas, ya que reduce la fricción y mejora la resistencia al desgaste en piezas de acero que trabajan bajo contacto continuo, como anillos de pistón, árboles de leva o engranajes. Además, este recubrimiento favorece la retención de lubricantes y proporciona una protección moderada contra la corrosión, actuando como una capa intermedia que evita el contacto directo metal-metal y mejora el comportamiento durante el periodo de adaptación (De Repositorios Universitarios Universidad Nacional Autónoma de México, 2019).

A pesar de sus ventajas, los recubrimientos fosfatados presentan limitaciones en ambientes altamente corrosivos o cuando se requiere una elevada dureza superficial. En este contexto, la incorporación de alúmina (Al_2O_3) surge como una estrategia complementaria para mejorar las propiedades del recubrimiento. La alúmina es un óxido cerámico con alta dureza, excelente estabilidad térmica y una alta resistencia al desgaste, lo que la convierte en un material ideal para reforzar recubrimientos metálicos. Su adición puede generar superficies más duras y con menor coeficiente de fricción, además de proporcionar una barrera física más estable frente a la difusión de especies corrosivas (Zhang et al. 2023). Uno de los retos a investigar la adición de partículas cerámicas es el

comprender la compatibilidad entre capas fosfatadas y nanopartículas cerámicas, la influencia de la alúmina en la morfología y adherencia del recubrimiento, así como su efecto sobre la dureza superficial del acero tratado.

El recubrimiento de óxido de aluminio es potencialmente muy eficaz en el desarrollo de superficies duras y resistentes al desgaste. Durante décadas, se han utilizado ampliamente diversas técnicas para depositar recubrimientos de óxido de aluminio (Shi-Gang et al., 2005). Por otro lado, a lo largo de los años, se han desarrollado técnicas instrumentales basadas en la indentación controlada de superficies metálicas, que permiten evaluar de forma indirecta propiedades como la adherencia, la cohesión y la calidad de los recubrimientos. Entre ellas, destaca el método Rockwell, empleado no con fines de medición de dureza, sino como una herramienta para analizar la respuesta mecánica del recubrimiento ante una carga concentrada. De acuerdo con la norma VDI 3198, esta técnica consiste en realizar una indentación controlada con un durómetro Rockwell, escala C (150 kg), sobre la superficie recubierta, y posteriormente examinar la zona deformada alrededor de la huella. El patrón de agrietamiento o desprendimiento del recubrimiento en el perímetro de la indentación permite evaluar cualitativamente la adherencia y la calidad del recubrimiento aplicado, proporcionando una referencia rápida y confiable para determinar la eficacia del proceso de deposición (VDI, 1992).

Por lo anterior, este trabajo tiene como propósito sintetizar y caracterizar recubrimientos de fosfato de manganeso modificados con partículas de alúmina (Al_2O_3) sobre acero AISI 1020, con el fin de evaluar el efecto de la incorporación de la fase cerámica en las propiedades estructurales, morfológicas y de adherencia del recubrimiento. Se estable el efecto concentración de Al_2O_3 en la formación de la capa fosfatada, su morfología superficial y su comportamiento frente a la deformación localizada, de acuerdo con la norma VDI 3198.

2. Metodología experimental

2.1. Baño fosfatado de manganeso con partículas de Al_2O_3 .

Para la preparación de este baño fosfatado de manganeso se pesa el óxido de manganeso, para preparar un baño a una concentración de 3 g/l (MnO , Sigma, 99%) en una balanza analítica para su posterior disolución, el MnO se transfiere a un vaso precipitado de 30 mL y se le adiciona ácido nítrico (HNO_3 , Meyer, 68-70%), asegurando una disolución completa del sólido, a la solución anterior se le añade ácido fosfórico (H_3PO_4 , Meyer, 85%) a 20 g/L para estabilizar el sistema y evitar la formación de precipitados no deseados. En un vaso de precipitados de 400 mL se vierte 300 mL de agua destilada. Se agrega la solución preparada anteriormente para garantizar una homogeneización adecuada, se adiciona partículas de alúmina continuando con la agitación constante. Se adicionan 0.2, 0.4, ó 0.6 g de Al_2O_3 con un tamaño de partícula de 0.5 micras, asegurando su dispersión uniforme en la solución por agitación magnética (~300 rpm) durante toda la preparación del baño de

fosfato, se mide el pH de la solución resultante, obteniendo un valor de $\text{pH} = 2$.

Para el ajuste de pH, se adiciona lentamente una solución de NaOH (Meyer, 99%) a una concentración de 2 M hasta alcanzar el pH de 2 y una vez logrado el ajuste de pH, se completa el volumen de la solución hasta 400 mL con agua destilada, obteniendo así la solución final ajustada y homogénea.

2.2. Recubrimiento en los sustratos.

La preparación de los recubrimientos en los sustratos previamente sandblasteados (superficie tratada mediante la técnica de "sandblasting", arenado o chorro de arena) comienza con una manipulación cuidadosa de las muestras para evitar daños o contaminación. Posteriormente, se realiza un lavado utilizando jabón comercial, aplicándolo en una sola dirección sobre ambas caras del sustrato. Finalmente, los sustratos (láminas de 5 x 2.5 cm de acero 1020) se enjuagan con agua destilada para eliminar cualquier residuo del lavado.

En el pretratamiento térmico del sustrato, se prepara una solución de agua destilada con jabón líquido comercial (Marca Axion), la cual se calienta previamente hasta alcanzar una temperatura entre 50°C , se introduce el sustrato en esta solución para eliminar impurezas y mejorar la adhesión del recubrimiento.

El baño de fosfato de manganeso modificado con partículas cerámicas de alúmina previamente preparado se calentó hasta una temperatura de 90°C , manteniendo el recipiente cubierto para minimizar la evaporación de la solución durante el proceso. Finalmente, para el proceso de fosfatado, se introduce el sustrato en el baño de fosfatado de manganeso a 90°C , se registra el tiempo de inicio del recubrimiento para cada sustrato introducido y se mantiene el sustrato en la solución, permitiendo la formación del recubrimiento de fosfato de manganeso.

2.3. Caracterizaciones

Todos los recubrimientos se caracterizaron por difracción de rayos X (DRX), para determinar la estructura cristalina de los recubrimientos de fosfato de manganeso haciendo uso de un difractómetro, marca SIEMENS, modelo D500 (radiación $\text{Cu-K}\alpha$ de 1.5418 \AA).

La morfología y espesor de los recubrimientos se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), a través de un microscopio electrónico de barrido marca JEOL modelo JSM-78. El espesor de los recubrimientos se determinó utilizando un medidor de espesores de la marca Positector, modelo 6000.

La adherencia de los recubrimientos se estudió de acuerdo con la norma VDI 3198, en donde se requiere realizar indentaciones con un durómetro Rockwell, escala C, usando una carga de 150 kg.

3. Resultados y discusión

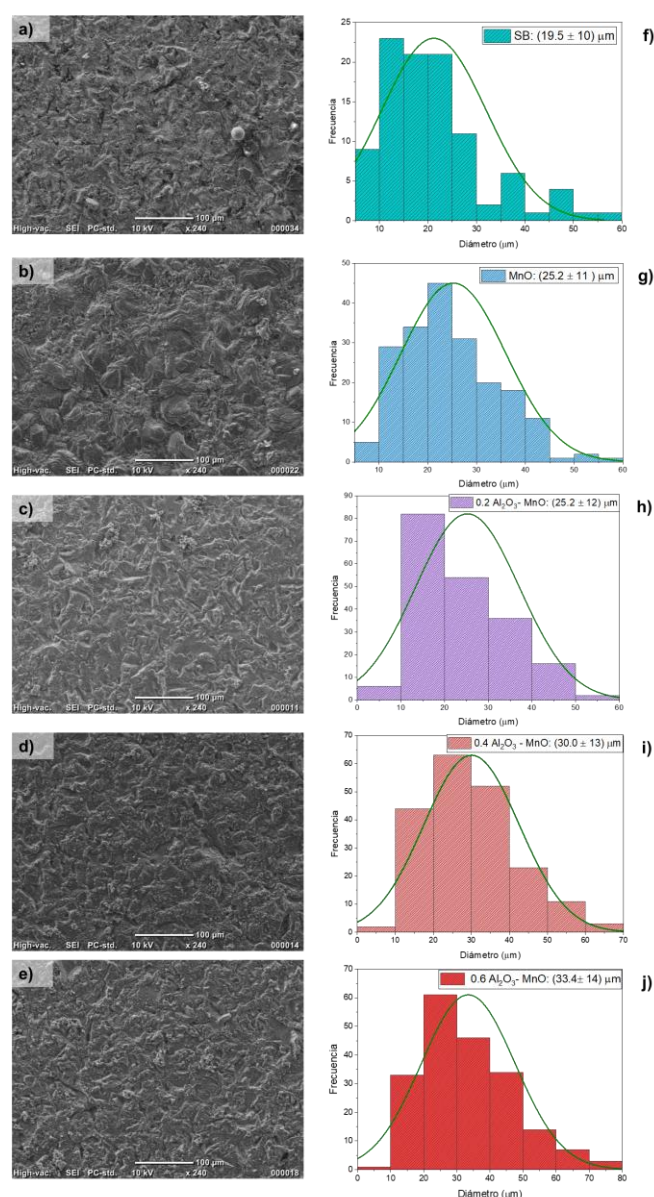


Figura 1. Micrográficas obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) de los sustratos: a) SB, b) MnO, c) $0.2 \text{ Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$, d) $0.4 \text{ Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$ y e) $0.6 \text{ Al}_2\text{O}_3\text{-MnO}$. Las gráficas f)–j) presentan los histogramas de distribución de tamaño de grano asociado.

En la Figura 1, se presentan las micrográficas correspondientes a 5 tipos de sustratos: (a) placas únicamente sometidas a sandblasteo (SB), (b) placas recubiertas mediante un baño fosfatado de manganeso (MnO) y (c–e) placas tratadas con el mismo baño, pero con la adición de 0.2, 0.4 y 0.6 g/L de Al_2O_3 , respectivamente. De manera complementaria, se incluyen los histogramas de distribución de diámetros de partículas (f–j), obtenidos a partir del análisis estadístico de las imágenes. El histograma obtenido mediante el uso del programa "ImageJ" de la medición de 200 granos, para elaborar las gráficas se empleó "OriginPro 2019". Esto permitió cuantificar el tamaño promedio y la dispersión de partículas, parámetros esenciales para evaluar la influencia de cada tratamiento en la microestructura superficial.

Las micrográficas correspondientes a la muestra SB (Figuras 1a & 1f) revelaron una superficie rugosa e irregular, sin recubrimiento cristalino definido, con partículas de tamaño reducido ($19.5 \pm 10 \mu\text{m}$). Esta condición coincide con lo descrito por Guo et al. (2020), quienes reportaron superficies vulnerables a la corrosión en ausencia de tratamientos fosfatados. En contraste, la muestra tratada con MnO (Figuras 1b & g) presentó una morfología con cristales más visibles y un recubrimiento más uniforme, alcanzando un tamaño promedio de partícula de $25.2 \pm 11 \mu\text{m}$, en concordancia con lo señalado por Noh et al. (2018) respecto a la formación de estructuras densas y adherentes. Con la adición de Al_2O_3 al baño fosfatado se observaron cambios progresivos en la microestructura. La muestra con 0.2 g/L (Figuras 1c & h) mostró una mejora en la densidad de cristales ($26.2 \pm 13 \mu\text{m}$), lo cual sugiere un efecto nucleante favorable, como también ha sido reportado por Noh et al. (2018). La muestra con 0.4 g/L (Figuras 1d & i) exhibió la morfología más uniforme y una cobertura densa y continua ($30.0 \pm 13 \mu\text{m}$), resultado consistente con Guo et al. (2020), quienes destacaron la importancia de la relación aditivo/baño en la estabilidad del recubrimiento. Finalmente, con 0.6 g/L de Al_2O_3 (Figuras 1e & j) se detectó una pérdida de uniformidad superficial y un incremento en la dispersión del tamaño de partícula ($33.4 \pm 14 \mu\text{m}$), en línea con lo descrito por Noh et al. (2018) sobre la tendencia a la aglomeración cuando se emplean concentraciones elevadas de Al_2O_3 .

Tabla 1. Mediciones promedio y desviación estándar del tamaño de partícula de los sustratos.

Sustrato	Promedio T. P	DE
SB	19.598 μm	9.941 μm
MnO	25.234 μm	10.762 μm
0.2 Al_2O_3 -MnO	25.213 μm	11.877 μm
0.4 Al_2O_3 -MnO	30.041 μm	12.558 μm
0.6 Al_2O_3 -MnO	33.446 μm	14.184 μm

La Tabla 1 muestra un incremento progresivo en el tamaño promedio de partícula con la adición de Al_2O_3 , desde 19.598 μm (SB) hasta 33.446 μm (0.6 g/L Al_2O_3 -MnO), acompañado de una mayor dispersión. Este comportamiento es consistente con lo observado en recubrimientos compuestos Ni-W-P/ Al_2O_3 , donde el aumento de partículas cerámicas favorece la densidad y dureza del recubrimiento Gul y Usta (2023), aunque concentraciones elevadas pueden generar irregularidades, como también se reportó en sistemas Al/ Al_2O_3 por Jiang et al. (2024).

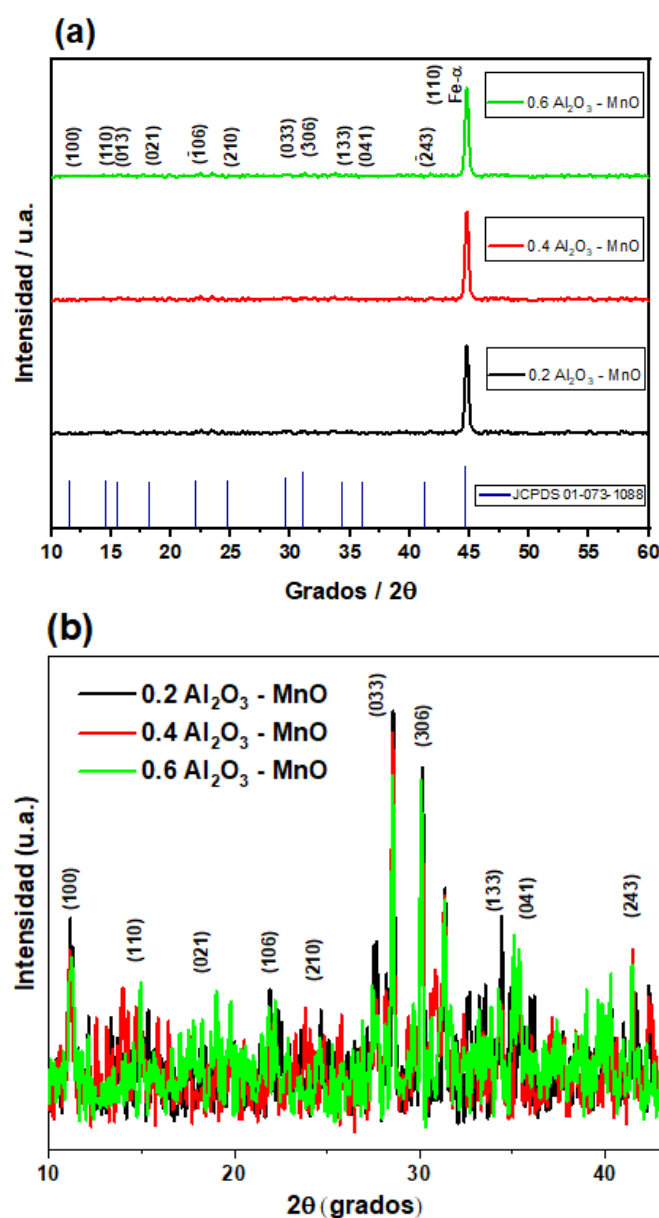


Figura 2. (a) Difractograma de DRX de las muestras 0.2, 0.4 y 0.6 Al_2O_3 -MnO, (b) zona ampliada que muestra los picos característicos del fosfato de manganeso.

En la figura 2, se observa el difractograma de los sustratos 0.2, 0.4 y 0.6 g/L Al_2O_3 -MnO, obtenido con un equipo Philips 5500-SIEMENS. Se identificó un pico $2\theta = 44^\circ$, correspondiente al plano (110) de la fase de hierro según lo reportado por Molina-Morales et al. (2024). Asimismo, los planos que aparecen en la región de 10 a 42° (ver Figura 2(b)) se indexan perfectamente a la estructura monoclínica de la fase hureaulita, del fosfato de manganeso, de acuerdo con la carta cristalográfica JCPDS 01-073-1088 (Bouddouch et al., 2020). Al aumentar la concentración de Al_2O_3 , la intensidad relativa de los picos de la fase fosfatada disminuye ligeramente, probablemente debido a una menor cristalinidad o a una mayor dispersión de partículas de alúmina, generando una estructura más fina y menos orientada cristalográficamente. La intensidad del pico de Fe- α permaneció constante, indicando que el espesor del recubrimiento no atenúa completamente la señal del sustrato. Estudios previos reportan que la

incorporación de partículas cerámicas o metálicas en recubrimientos de fosfato reduce el tamaño cristalino, favorece estructuras más compactas y altera la orientación preferencial de los cristales, disminuyendo la intensidad de los picos sin eliminar las fases principales (Mehta et al., 2017; Ma et al., 2017; Rocha-Rangel et al., 2018).

Tabla 2. Mediciones de las pruebas de dureza Rockwell C de los sustratos.

Sustrato	Tipo de falla	Calidad norma
0.2 Al ₂ O ₃ -MnO	Aceptable	HF2
0.4 Al ₂ O ₃ -MnO	Aceptable	HF2
0.6 Al ₂ O ₃ -MnO	Aceptable	HF2

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las pruebas de adherencia de los recubrimientos de fosfato de manganeso modificados con partículas de alúmina dureza a partir de la indentación Rockwell en escala C (150 kg), de acuerdo con la norma VDI 3198, todos los recubrimientos evaluados corresponden a la clase de adherencia HF2, lo que indica un nivel aceptable de adherencia (Lenz et al., 2020). La norma establece seis categorías (HF1–HF6) para clasificar el daño alrededor de la huella de indentación. En la clase HF1, solo se permiten fisuras finas en el borde de la huella, sin evidencias de delaminación. La clase HF2 se caracteriza por la presencia de pequeños desprendimientos aislados, mientras que en la clase HF3 las delaminaciones son de mayor tamaño y pueden estar conectadas de forma circunferencial alrededor de la huella.

Este comportamiento sugiere que la incorporación de partículas cerámicas contribuye a mantener una buena cohesión en la interfaz del recubrimiento. Resultados similares han sido reportados por Smialek (2000), quien destacó que la formación y mantenimiento de escalas protectoras de Al₂O₃ dependen en gran medida de la adherencia, la integridad microestructural y la resistencia a la delaminación.

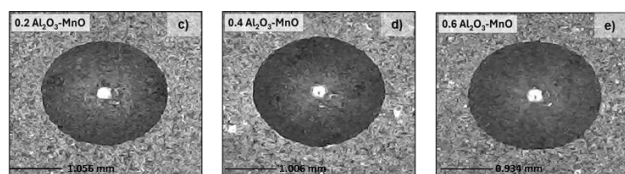


Figura 3. Micrografías de indentación HRC de los sustratos: c) 0.2 Al₂O₃–MnO, d) 0.4 Al₂O₃–MnO y e) 0.6 Al₂O₃–MnO.

La Figura 3 muestra las indentaciones Rockwell C en sustratos de acero AISI 1020 recubiertos con fosfato de manganeso y diferentes concentraciones de Al₂O₃ (0.2, 0.4 y 0.6 g/L). El análisis por Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) permitió evaluar la periferia de las indentaciones y detectar posibles desprendimientos o craquelado. Se observa una disminución progresiva del área de indentación: 0.875 mm² para 0.2 g/L, 0.794 mm² para 0.4 g/L y 0.684 mm² para 0.6 g/L, lo que indica un incremento de la adherencia con la incorporación de partículas cerámicas. La muestra con 0.4 g/L presentó la mejor distribución homogénea de partículas y un comportamiento mecánico estable, clasificada como HF2 según la norma VDI 3198, Lenz et al. (2020). La muestra con 0.6 g/L presentó ligera irregularidad en la huella, posiblemente por aglomeración de partículas, lo que sugiere que concentraciones elevadas pueden generar defectos internos

según lo reportado por Emens et al. (2017). Estos resultados confirman que los recubrimientos con nanopartículas de Al₂O₃ mejoran la adherencia superficial del fosfato de manganeso, favoreciendo la resistencia al desgaste, en concordancia con lo reportado en estudios recientes (Yadav y Yadav, 2023).

Tabla 3. Promedio y desviación estándar de espesores de los sustratos.

Sustrato	Promedio	DE
0.2 Al ₂ O ₃ -MnO	9.6 μm	2.07 μm
0.4 Al ₂ O ₃ -MnO	11.6 μm	2.70 μm
0.6 Al ₂ O ₃ -MnO	7.8	1.30 μm

La Tabla 3 muestra los espesores de los recubrimientos medidos con PosiTector-6000, se realizaron 5 mediciones de cada sustrato. Se observa un aumento del espesor al incrementar moderadamente la concentración de Al₂O₃, alcanzando su valor máximo con 0.4 g/L, posiblemente debido a una mayor densidad de sitios de nucleación generados por la dispersión de partículas cerámicas Gan et al. (2012). En la muestra con 0.6 g/L se detectó una disminución del espesor, probablemente por sobresaturación y aglomeración de partículas, efecto similar al descrito por Pakpum y Pussadee (2016). Esto indica que una concentración moderada de Al₂O₃ optimiza el espesor de recubrimiento, favoreciendo la protección superficial sin comprometer la adherencia ni generar defectos.

4. Conclusiones

La incorporación de partículas de Al₂O₃ en los recubrimientos de fosfato de manganeso influye significativamente en la morfología de las partículas del recubrimiento. En particular, una concentración de 0.4 g/L de alúmina promueve una distribución más uniforme y homogénea de los granos. Las pruebas de adherencia Rockwell C mostraron un incremento en la resistencia a concentraciones de 0.2 y 0.4 g/L, lo que evidencia una mejora en la cohesión del recubrimiento. Además, a 0.4 g/L de Al₂O₃ se obtuvo el mayor espesor del recubrimiento, indicando que la adición de alúmina favorece la formación de capas más gruesas, compactas y con granos más finos. En conjunto, estas características contribuyen a potenciar la protección y durabilidad del recubrimiento de fosfato de manganeso.

La modificación con alúmina es una alternativa viable para mejorar recubrimientos empleados en componentes sujetos a fricción o ambientes corrosivos, como los de la industria automotriz o mecánica. A futuro, se sugiere evaluar su comportamiento frente a la corrosión y explorar la incorporación de otras partículas cerámicas para optimizar su desempeño.

Agradecimientos

Los autores agradecen al CCAI de la Universidad Tecnológica Fidel Velázquez por el apoyo brindado en la realización de los análisis experimentales. Asimismo, se reconoce al Departamento de Materiales de la UAM por las facilidades otorgadas para la caracterización.

Referencias

- Ernens, D., De Rooij, M., Pasaribu, H., Van Riet, E., Van Haafden, W., & Schipper, D. (2017). Mechanical characterization and single asperity scratch behaviour of dry zinc and manganese phosphate coatings. *Tribology International*, 118, 474-483. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.04.034>
- Gan, X., Cai, Z., Qiao, M., Gao, S., Zhu, M., & Yu, H. (2012). Fretting wear behaviors of mandibular condylar cartilage of natural temporomandibular joint in vitro. *Tribology International*, 63, 204-212. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.08.016>
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura modo*. Pearson Educación.
- Gul, H., & Usta, İ. (2023). Effect of Alumina Concentration on Morphology, Wear, and Corrosion: Electroless Ni-W-P/Al₂O₃ Composite Coatings on Aluminum Surfaces. *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 32(13), 6107-6122. <https://doi.org/10.1007/s11665-023-08184-x>
- Guo, L., Huang, Q., Zhang, C., Wang, J., Shen, G., Ban, C., & Guo, L. (2020). Study on the formation of Mn-P coatings with significant corrosion resistance on Q235 carbon steels by adjusting the ratio of phosphorus to manganese. *Corrosion Science*, 178, 108960. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2020.108960>
- Huerta Mendoza, Moisés. (2008). "Estudio del proceso de fosfatizado en acero en la industria de auto partes". (Tesis de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, UNAM. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/3457481>
- Hughes, A. (2017). Conversion coatings. En Elsevier eBooks (pp. 108-114). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409547-2.13441-9>
- Jiang, W., Shen, X., Wang, Z., Liu, Y., Zhang, X., Wang, E., & Zhang, J. (2024). Effect of Al₂O₃ on Microstructure and Corrosion Characteristics of Al/Al₂O₃ Composite Coatings Prepared by Cold Spraying. *Metals*, 14(2), 179. <https://doi.org/10.3390/met14020179>
- Lenz, B., Hasselbruch, H., & Mehner, A. (2020). Automated evaluation of Rockwell adhesion tests for PVD coatings using convolutional neural networks. *Surface And Coatings Technology*, 385, 125365. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125365>
- Ma, P., Jia, Y., Gokuldoss, P. K., Yu, Z., Yang, S., Zhao, J., & Li, C. (2017). Effect of Al₂O₃ Nanoparticles as Reinforcement on the Tensile Behavior of Al-12Si Composites. *Metals*, 7(9), 359. <https://doi.org/10.3390/met7090359>
- Mehta, N. S., Sahu, P. K., Tripathi, P., Pyare, R., & Majhi, M. R. (2017). Influence of alumina and silica addition on the physico-mechanical and dielectric behavior of ceramic porcelain insulator at high sintering temperature. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 57(4), 151-159. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.11.002>
- Milošev & Frankel (2018). Conversion Coatings Based on Zirconium and/or Titanium. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(3), C127-C144. DOI: 10.1149/2.0371803jes.
- Molina-Morales, M., Reyes-Miranda, J., Garrido-Hernández, A., De Ita-De la Torre, A. S., Barrón-Meza, M. Á., & García-Domínguez, G. (2024). Efecto del pH, precursores y concentración en la preparación de recubrimientos de fosfato de manganeso. *PÁDI Boletín Científico de Ciencias Básicas E Ingenierías del ICBI*, 12, 122-127. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iespecial5.13827>
- Noh, Y. T., Byoun, Y. M., Kim, H. Y., Kang, H. S., Park, J. K., Seo, S. G., & Lee, C. H. (2018). Effects of Al₂O₃ Additive on Manganese Phosphate Conversion Coating of Carbon Steel. *Materials Science Forum*, 932, 81-90. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.932.81>
- Pakpum, C., & Pussadee, N. (2016). Air bearing surface recessed steep wall via optical proximity correction mask and fluorine-based plasma etching. *Surface And Coatings Technology*, 306, 299-304. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.072>
- Rietveld, H. M. (1969). A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. *Journal Of Applied Crystallography*, 2(2), 65-71. <https://doi.org/10.1107/s0021889869006558>
- Rocha-Rangel, E., La Fuente, A. P., Rodríguez-García, J. A., Armendáriz-Mireles, E. N., & Calles-Arriaga, C. A. (2018). Use of Silver Nanoparticles as Tougheners of Alumina Ceramics. En *InTech eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76949>
- Shi-Gang, X., Li-Xin, S., Rong-Gen, Z., & Xing-Fang, H. (2005). Properties of aluminium oxide coating on aluminium alloy produced by micro-arc oxidation. *Surface And Coatings Technology*, 199(2-3), 184-188. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.11.044>
- Smialek, J. (2000). Maintaining adhesion of protective Al₂O₃ scales. *JOM*, 52(1), 22-25. <https://doi.org/10.1007/s11837-000-0110-4>
- Yadav, B., & Yadav, B. (2023, 15 junio). SAE – AISI 1020 (UNS G10200) – Composition, Properties and Uses. *ThePipingMart Blog*. <https://blog.thepipingmart.com/grades/sae-aisi-1020-uses-properties-and-composition/>
- Zhang, L., Wang, X., & Li, J. (2023). Effect of Al₂O₃ on Microstructure and Corrosion Characteristics of Al/Al₂O₃ Composite Coatings Prepared by Cold Spraying. *Materials*, 14(2), 179.