

Efecto del pH, precursores y concentración en la preparación de recubrimientos de fosfato de manganeso

Effect of pH, precursors, and concentration on the preparation of manganese phosphate coatings

M. Molina-Morales ^a, J. Reyes-Miranda ^{a,*}, A. Garrido-Hernández ^a, A.S. de Ita de la Torre ^a
M. A. Barrón-Meza ^a, G. García Domínguez ^b

^a Departamento de Materiales, Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, 02128 Alcaldía Azcapotzalco, Ciudad de México, México

^b Universidad Tecnológica de Tecámac, 55740 Tecámac, Estado de México, México.

Resumen

En este trabajo se analizó la influencia de las condiciones de síntesis de recubrimientos de fosfato de manganeso, partiendo de MnO y MnCl₂ como precursores, concentración de precursores de 3 y 4 g·L⁻¹ Mn y pH de 3 y 5, sobre las propiedades estructurales, morfológicas y de corrosión de los recubrimientos depositados sobre sustratos de acero AISI 1020 a una temperatura fija de 90 °C por 35 minutos. Se llevaron a cabo caracterizaciones estructurales por difracción de rayos X, que permitió garantizar que la fase formada corresponde a la hureaulita del fosfato de manganeso. Asimismo, se caracterizó por microscopía electrónica de barrido la morfología de los recubrimientos, mismos que en su mayoría son homogéneos con granos de fosfato de manganeso facetados. Se determinaron los espesores de los recubrimientos usando un equipo Positector 6000 y se determinó a partir de un análisis de varianza ANOVA que el pH = 5 es el factor y nivel que más influye sobre el espesor del recubrimiento, alcanzando espesores de alrededor de 14 µm. Se analizó la resistencia a la corrosión de los recubrimientos y se determinó que las mejores condiciones de preparación de recubrimientos son a un pH = 5 y usando óxido de manganeso como fuente precursora de manganeso.

Palabras Clave: Fosfato de manganeso, pH, dureza Vickers, hureaulita.

Abstract

In this work, the influence of synthesis conditions for manganese phosphate coatings was analyzed. The MnO and MnCl₂ were used as former precursors, the precursor concentration were 3 and 4 g·L⁻¹ Mn, and the pH were fixed at 3 and 5, on the structural, morphological, and corrosion properties of the coatings deposited on AISI 1020 steel substrates at a fixed temperature of 90 °C for 35 minutes. Structural characterizations were carried out using X-ray diffraction, which confirmed that the phase formed corresponds to manganese phosphate hureaulite. Additionally, the morphology of the coatings was characterized by scanning electron microscopy, showing that they are mostly homogeneous with faceted manganese phosphate grains. The thickness of the coatings was measured using a Positector 6000 device, and it was determined through an ANOVA variance analysis that pH = 5 is the most influential factor and level on the coating thickness, reaching thicknesses of around 14 µm. The corrosion resistance of the coatings was analyzed, and it was determined that the best preparation conditions for the coatings are at pH = 5 and using manganese oxide as the manganese precursor source.

Keywords: Manganese phosphate, pH, Vickers hardness, hureaulite.

1. Introducción

El acero es un material esencial en la industria mexicana, con aplicaciones que abarcan desde la construcción hasta la fabricación de automóviles y maquinaria pesada. México es

uno de los mayores productores de acero en América Latina, y ocupa el 15° productor de acero en el mundo de acuerdo con datos reportados por la Cámara Mexicana de la Industria del Hierro y Acero (CANACERO, 2024) y su economía industrial depende en gran medida de la disponibilidad y calidad de este

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

Correo electrónico: Mariana Molina-Morales (al2242801012@azc.uam.mx), joremi@azc.uam.mx (Joan Reyes-Miranda), agh@azc.uam.mx (Aristeo Garrido-Hernández), add@azc.uam.mx (Antonio Silvio de Ita de la Torre), bmma@azc.uam.mx (Miguel Ángel Barrón-Meza), garciagiovanni1311@gmail.com (Giovanni García Domínguez)

material. La demanda de acero de alta resistencia y durabilidad sigue aumentando, lo que subraya la necesidad de técnicas de protección y mejora para prolongar su vida útil. El acero 1020 es un acero al carbono de baja aleación, conocido por su versatilidad y facilidad de maquinado (Ramezanzadeh et al., 2015). Su uso se extiende a componentes estructurales, piezas automotrices, y aplicaciones industriales donde se requieren buenas propiedades mecánicas a un costo razonable. Sin embargo, su susceptibilidad a la corrosión en ambientes agresivos y su baja resistencia al desgaste lo hace candidato ideal para tratamientos de superficie que mejoren su resistencia y vida útil (Popić et al., 2011).

Existen varios tratamientos superficiales para el acero, como el galvanizado, anodizado, recubrimientos cerámicos y fosfatados. La fosfatación es crucial para incrementar la durabilidad del acero, especialmente en aplicaciones donde está expuesto a condiciones extremas de corrosión y desgaste (Tamilselvi et al., 2015). Los recubrimientos de fosfato de hierro (Wang et al., 2024), zinc (Kumar et al., 2012) y manganeso (Galvan-Reyes et al., 2016) son ampliamente utilizados para el tratamiento de superficies en diversas aleaciones, sobre todo en las de acero, ya que ofrecen una buena adherencia y resistencia al desgaste, debido a que la dureza de estos recubrimientos llega a ser mayor que la del metal base, además de ser más económicos en comparación con otros métodos de recubrimiento (Galvan-Reyes et al., 2016; Zang et al., 2020). Entre ellos, el fosfatado de manganeso destaca por su capacidad para mejorar la resistencia al desgaste y la corrosión, además de facilitar el deslizamiento en componentes mecánicos. Este tratamiento es particularmente relevante en la industria automotriz y en la fabricación de herramientas, donde la combinación de protección y funcionalidad es crítica.

Estos recubrimientos actúan como una barrera protectora, reduciendo la oxidación y proporcionando una base ideal para la posterior aplicación de pinturas o lubricantes.

Para obtener recubrimientos de fosfato homogéneos sobre el acero, es esencial controlar varios parámetros del proceso, como la composición química del baño, la temperatura, el pH y el tiempo de inmersión (Du et al., 2021; Shibli & Chacko, 2011). En los procesos de fosfatado basados en manganeso, es fundamental mantener un pH adecuado que permita la formación de cristales de hureaulita (Frost et al., 2013). Dado que los baños de fosfatado suelen tener un pH muy bajo (menor a 1), es necesario ajustarlo con ácidos fuertes para que se logre un recubrimiento óptimo sobre el acero a temperaturas elevadas (~90 °C). Sin embargo, bajo esas condiciones de pH y temperaturas elevadas, se puede provocar una rápida oxidación en la superficie del metal base, afectando finalmente la vida útil del componente (Galvan-Reyes et al., 2016).

La reacción principal durante la fosfatación del acero 1020 involucra la formación de fosfato de manganeso ($Mn_3(PO_4)_2$) a partir de la interacción del acero con una solución ácida de fosfato y una fuente de manganeso (MnO o $MnCl_2$). Este proceso forma una capa protectora sobre la superficie del acero, que es adherente y resistente al desgaste y a la corrosión.

Las tendencias actuales en la mejora de los fosfatados incluyen la modificación de las concentraciones de los reactivos, la temperatura del baño, y el tiempo de inmersión. Estas modificaciones tienen como objetivo aumentar la densidad y uniformidad del recubrimiento, mejorar la resistencia a la corrosión y optimizar las propiedades

mecánicas. En este trabajo, se propone la formación de recubrimientos de fosfato de manganeso en condiciones de pH entre 3 y 5, realizando dicho ajuste con hidróxido de sodio ($NaOH$), lo que evita en gran medida la oxidación de la superficie del metal base y garantizando la formación de recubrimientos homogéneos. Asimismo, se determinaron las propiedades estructurales, morfológicas y resistencia a la corrosión de los recubrimientos.

2. Metodología

2.1. Proceso de fosfatado de manganeso

Se realizó la experimentación para la obtención de recubrimientos de fosfatado utilizando dos precursores diferentes de manganeso: MnO y $MnCl_2$. Para cada precursor, se emplearon concentraciones de 3, y 4 g-L⁻¹ de manganeso. Además, también se consideró el pH como una variable que tomó valores de 3 y 5. La temperatura del baño se mantuvo constante a 90 °C, y el tiempo de inmersión fue de 35 minutos para asegurar la reproducibilidad de los resultados. De acuerdo con estas variables y niveles se desarrolló un diseño experimental factorial 2³ (3 factores y 2 niveles), para dar un total de 8 experimentos como base, asimismo, se consideró una réplica para dar un total de 16 experimentos. Las variables y niveles del diseño experimental se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables y factores considerados en el diseño experimental factorial 2³.

Niveles	Precursor	Conc. precursor [g-L ⁻¹]	pH
1	MnO	3	3
2	MnCl ₂	4	5

Tabla 2. Experimentación realizada para la obtención de recubrimientos de fosfato de manganeso de manera aleatoria.

Número de experimento	Precursor	Concentración de precursor [g-L ⁻¹]	pH
1	MnO	4	3
2	MnO	4	3
3	MnO	3	5
4	MnCl ₂	4	3
5	MnO	4	5
6	MnO	3	3
7	MnCl ₂	3	5
8	MnO	3	5
9	MnCl ₂	3	3
10	MnCl ₂	3	5
11	MnCl ₂	4	5
12	MnO	3	3
13	MnCl ₂	4	5
14	MnCl ₂	4	3
15	MnCl ₂	3	3
16	MnO	4	5

Previo a la preparación de los baños de fosfato de manganeso descritos en la Tabla 2, las láminas del metal base de acero al carbono AISI 1020 de 3" x 5" fueron sometidas a una limpieza mecánica por arenado utilizando óxido de aluminio, malla 80, para una abrasión superficial moderada. Posteriormente, se llevó a cabo una limpieza de los sustratos usando jabón comercial y enjuagando con agua destilada. Una vez secos los sustratos se sumergieron en los baños de fosfato de manganeso, de acuerdo con la tabla 2 y bajo las condiciones de temperatura y tiempo descritas previamente.

2.2. Caracterización de los recubrimientos de fosfato de manganeso por difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido.

Se realizaron análisis de Difracción de Rayos X (DRX) con un difractómetro Siemens D500, con el objetivo de identificar las fases cristalinas presentes en los recubrimientos, proporcionando información sobre la estructura interna y su relación con la concentración de reactivos. Además, se empleó microscopía electrónica de barrido (MEB) utilizando un equipo JEOL JCM-6000, para caracterizar la morfología superficial y la homogeneidad del recubrimiento, lo cual es vital para correlacionar los resultados con las propiedades estructurales, de morfología y electroquímicas.

2.3. Medición de espesor y análisis de corrosión

El espesor del recubrimiento de fosfato de manganeso fue medido utilizando un medidor de espesores Positector 6000. Esta técnica permite obtener medidas no destructivas del espesor, proporcionando información detallada sobre la uniformidad y calidad del recubrimiento aplicado. Para las pruebas de corrosión, se utilizó una celda en la cual se incorporó un contraelectrodo de acero inoxidable 304, un electrodo de referencia de cloruro de plata-plata y la lámina de acero inoxidable 304 con los diferentes recubrimientos sintetizados. Dichos componentes, se sumergieron en una solución de salmuera (NaCl) al 3.5%. La solución de salmuera se preparó con 1.4 gr de NaCl en 40 ml de agua destilada. El potencial necesario fue suministrado mediante un equipo Autolab, realizando barridos desde -1 a -0.1 V con una velocidad de escaneo de 1 mV-s⁻¹.

3. Discusión de Resultados

3.1. Análisis estructural de los recubrimientos de fosfato de manganeso

En la Figura 1 se muestran los resultados de difracción de rayos X de los 8 recubrimientos de fosfato de manganeso, de acuerdo con el diseño experimental 2³. Como se puede apreciar, los recubrimientos preparados a un pH = 3, exhiben una intensidad muy pequeña de los planos difractados, debido a que los espesores de estos recubrimientos estuvieron en un intervalo de 1 a 2.2 μm (ver Figura 2), dichos espesores son muy pequeños para poder detectarse apropiadamente con el equipo de difracción de rayos X. Sin embargo, los recubrimientos preparados a pH = 5, desarrollaron espesores más gruesos, de alrededor de 4.4 a 14.4 μm (ver Figura 2), por

lo que la intensidad de los planos difractados es mayor. Los difractogramas se indexan perfectamente a la estructura monoclinica de la fase hureaulita, del fosfato de manganeso, de acuerdo con la carta cristalográfica JCPDS 01-073-1088 (Bouddouch et al., 2020). Además, el pico que aparece en un ángulo $2\theta = 44^\circ$. Corresponde al plano (110) de la fase alfa (α) del hierro (Zang et al., 2020).

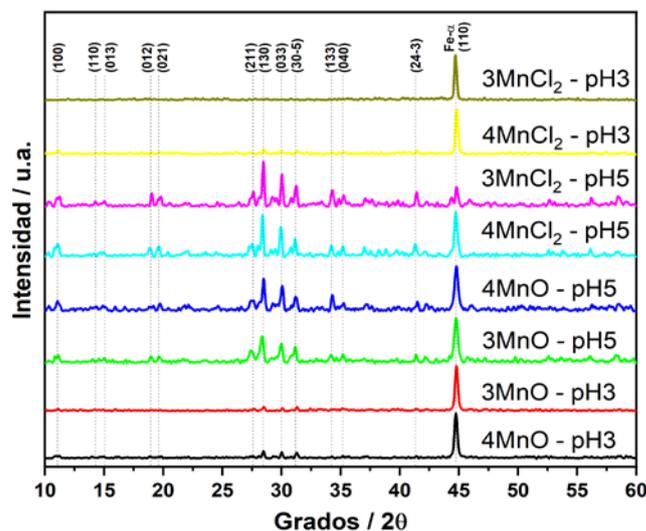


Figura 1. Difractogramas de los recubrimientos de fosfato de manganeso obtenidos a diferentes condiciones de síntesis.

3.2. Análisis de espesores de los recubrimientos de fosfato de manganeso

La Figura 2 muestra el promedio de los espesores obtenidos usando un equipo Positector-6000. De acuerdo con la gráfica, con pH = 3, los espesores son muy delgados, alcanzando un valor máximo de 2.2 μm cuando se usa como precursor el MnO y una concentración de 3 g-L⁻¹. Sin embargo, a un pH = 5 y una concentración de 3 g-L⁻¹, tanto para el precursor MnO y MnCl₂, se obtienen espesores promedio de 14.4 y 13.8 μm , respectivamente. Finalmente, cuando incrementa la concentración a 4 g-L⁻¹ a un pH = 5, hay una reducción considerable del espesor a 7 y 4.4 μm , para los precursores MnO y MnCl₂, respectivamente. De acuerdo con esto, a valores de pH mayores hay un mayor desarrollo de espesores.

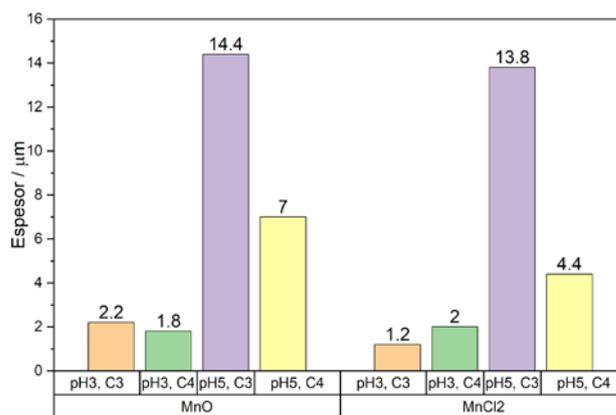


Figura 2. Espesores determinados para cada uno de los recubrimientos obtenidos a diferentes condiciones de síntesis.

3.3. Análisis de varianza (ANOVA)

Tomando como base los resultados de espesor se llevó a cabo un Análisis de Varianza (ANOVA) para determinar el efecto de cada uno de los factores, y en su caso, de una posible interacción. Dicho análisis se presenta en la Tabla 3. De acuerdo con estos resultados, el pH es el factor que más influye en el espesor de los recubrimientos con un 66.32 %, seguido de la interacción entre la concentración y PH con una contribución del 16.58 %, y finalmente la concentración con una contribución del 14.69 %.

Tabla 3. ANOVA considerando como variable de respuesta el espesor de los recubrimientos de fosfato de manganeso.

Fuente de variabilidad	G.L	Suma de Cuadrados	Contribución	Media de cuadrados	Valor F	Valor P
Modelo	7	431.7	99.08%	61.67	123.36	0.00
Lineal	3	354.0	81.24%	118.00	236.00	0.00
Precursor	1	1.0	0.23%	1.00	2.00	0.19
Concentración	1	64.0	14.69%	64.00	128.00	0.00
pH	1	289.0	66.32%	289.00	578.00	0.00
Interacción de 2 factores	3	76.7	17.61%	25.58	51.17	0.00
Precursor*Concentración	1	2.2	0.52%	2.25	4.50	0.06
Precursor*pH	1	2.2	0.52%	2.25	4.50	0.06
Concentración*pH	1	72.2	16.58%	72.25	144.50	0.00
Interacción de 3 factores	1	1.0	0.23%	1.00	2.00	0.19
Precursor*Concentra.*pH	1	1.0	0.23%	1.00	2.00	0.19
Error	8	4.0	0.92%	0.50		
Total	15	435.7	100.00%			

La figura 3 presenta las gráficas de efectos principales de los 3 factores, en donde se logra apreciar que con un pH = 5 se logran espesores más gruesos. Respecto a la concentración, el desarrollo de los espesores más gruesos se logra con una concentración de 3 g·L⁻¹. Finalmente, el tipo de precursor no influye en un cambio estadísticamente significativo sobre el espesor, información que fue confirmada con el análisis de varianza, dado que el valor estadístico de prueba P fue de 0.195 y considerando un nivel de significancia $\alpha = 0.05$, se acepta la hipótesis nula y se concluye que el precursor no modifica el espesor del recubrimiento.

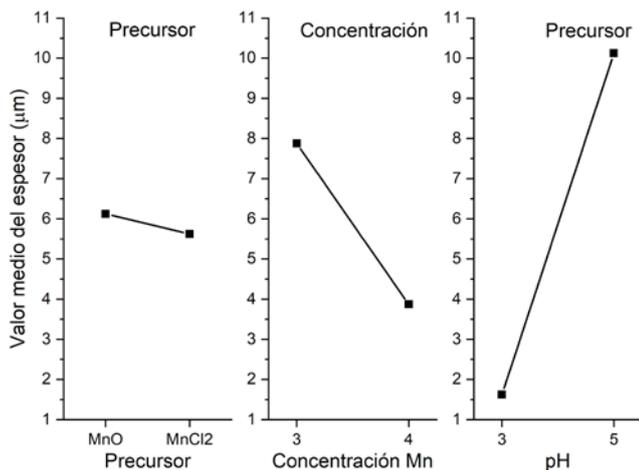


Figura 3. Gráfica de efectos principales de los factores sobre el espesor de los recubrimientos.

La Figura 4 muestra la gráfica de Pareto que indica que si el valor de cada uno de los factores es mayor a 2.31, entonces el factor o interacción influyen en un cambio significativo sobre la variable de respuesta, en este caso sobre el espesor. Por lo tanto, se demuestra que el pH, seguido de la interacción concentración-pH y finalmente la concentración provocan

una modificación sobre el espesor de los recubrimientos de fosfato de manganeso.

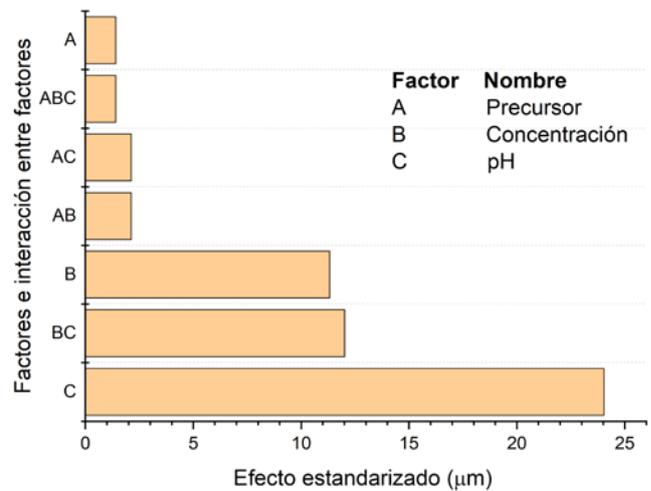


Figura 4. Gráfica de Pareto para el análisis de efectos principales e interacción de factores.

3.4. Análisis morfológico de los recubrimientos de fosfato de manganeso

En la Figura 5 se presentan los resultados de microscopia electrónica de barrido utilizando como precursor MnO. Cada una de las imágenes mostradas está etiquetada con el pH y con la concentración usada en la preparación del recubrimiento. Como se puede apreciar en la figura 5, a un pH = 3 y concentraciones de 3 y 4 g·L⁻¹, se observan morfologías uniformes y finas. La superficie presenta una textura homogénea y compacta, sin la presencia de cristales grandes. Este tipo de morfología puede ser indicativa de una nucleación muy densa y homogénea de los cristales de fosfato de manganeso, lo que da lugar a una superficie con características isotrópicas y una distribución uniforme de partículas. Este tipo de superficie podría ofrecer una protección uniforme y, dependiendo de la aplicación, podría mejorar ciertas propiedades, como la adhesión de lubricantes o la resistencia a la corrosión, debido a la ausencia de irregularidades grandes en la superficie.

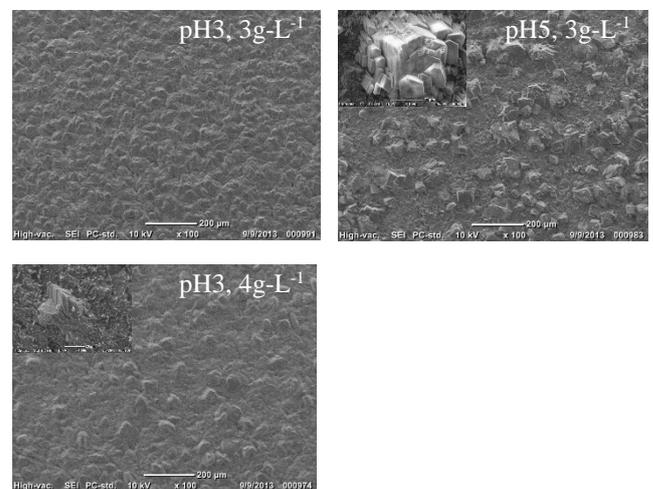


Figura 5. Imágenes del MEB de los recubrimientos de fosfato de manganeso obtenidos a partir de MnO.

Por otro lado, al usar valores de $\text{pH} = 5$ y una concentración de $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Figura 5), la morfología muestra una superficie rugosa y menos definida en comparación con los recubrimientos obtenidos a $\text{pH} = 3$. En este caso, los cristales presentan formas irregulares y una apariencia áspera en toda la superficie. Este tipo de morfología podría sugerir un recubrimiento de fosfato de manganeso con una nucleación menos uniforme en donde posiblemente el recubrimiento no ha cristalizado de manera completamente homogénea, o donde las condiciones de fosfatado, particular la composición química ha dado lugar a una estructura menos ordenada y más rugosa. Esta rugosidad superficial puede ser beneficiosa en aplicaciones donde se requiere una mayor fricción o adhesión, pero también podría reducir la resistencia al desgaste o la protección anticorrosiva en comparación con una morfología de cristales más grandes y uniformes, como la que se ve en la primera imagen.

Por otro lado, en la Figura 6 se muestran las morfologías de los recubrimientos de fosfato de manganeso cuando se usa MnCl_2 . Bajo condiciones de $\text{pH} = 3$ y una concentración de $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ se observa una superficie con una textura fina y bastante uniforme, asimismo, no se presentan estructuras cristalinas grandes o definidas. La superficie está cubierta por una morfología más esponjosa con una distribución homogénea de pequeños cristales. A un $\text{pH} = 3$ y una concentración de $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ se observa una superficie con una textura rugosa, desordenada y porosa, que podría ser el resultado de un crecimiento cristalino menos uniforme o de una nucleación heterogénea. Finalmente, a un $\text{pH} = 5$ y una concentración de $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ se muestra una morfología homogénea y característica de cristales o granos poliédricos, con una estructura bien definida y facetas planas (Galvan-Reyes et al., 2016). En particular, los cristales tienen bordes nítidos y ángulos definidos, lo que indica que pueden ser de una fase sólida ordenada con estructura monoclinica (ver Figura 1).

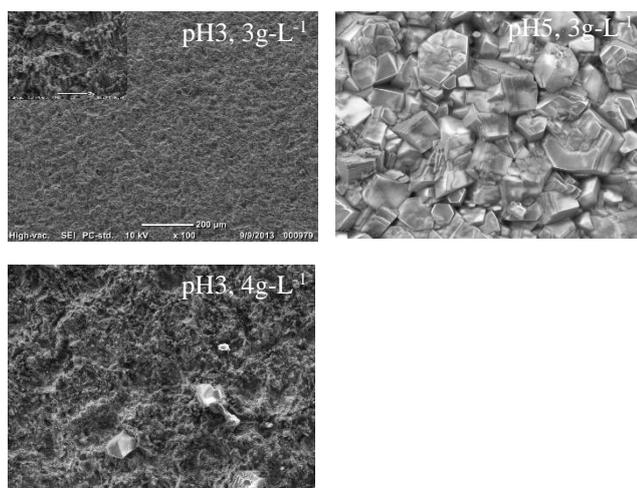


Figura 6. Imágenes del MEB de los recubrimientos de fosfato de manganeso obtenidos a partir de MnCl_2 .

3.5. Curvas de polarización potenciodinámica para análisis de corrosión

A fin de determinar la resistencia a la corrosión de los recubrimientos de fosfato de manganeso se llevaron a cabo estudios electroquímicos. En la Figura 7 se muestran las gráficas de polarización potencial electroquímico (V) vs densidad de corriente ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$). Como se puede apreciar, los recubrimientos realizados con cloruro de manganeso tienden a tener una mayor actividad electroquímica a potenciales más positivos, incluso mayores que la muestra testigo sin recubrimiento, lo que podría sugerir una menor resistencia a la corrosión en comparación con los recubrimientos preparados con óxido de manganeso. Asimismo, las muestras preparadas con $\text{pH} = 3$, indican mayor actividad electroquímica en comparación con valores de $\text{pH} = 5$, lo que indica que, en condiciones de preparación de los recubrimientos a pH bajos, se dan condiciones más agresivas para el material, lo que resulta en mayor corrosión. La muestra preparada a $\text{pH} = 5$ y una concentración de $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ es la que presenta una menor actividad electroquímica, por lo tanto, mayor resistencia a la corrosión. De acuerdo con los resultados de microscopía electrónica de barrido para esta muestra resistente a la corrosión, la superficie presentó una textura homogénea y compacta, sin la presencia de cristales grandes y un espesor de recubrimiento de apenas $1.8 \mu\text{m}$.

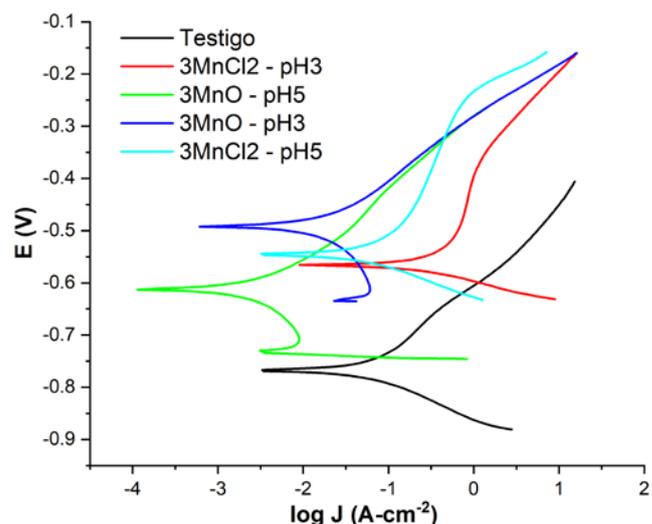


Figura 7. Curvas de polarización potenciodinámica.

3.6. Determinación del ángulo de contacto

Se analizó cómo la variación en la concentración afecta la capacidad del recubrimiento para reducir la energía superficial y su implicación en la adhesión y resistencia al desgaste. A fin de conocer la influencia de las variables de síntesis sobre la tensión superficial de los recubrimientos se determinó el ángulo de contacto entre la superficie y la gota de agua para cada uno de los recubrimientos realizados (ver Figura 8). Se determinó que a $\text{pH} = 5$ y a concentraciones de $4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ hay un mayor extendimiento del ángulo de contacto, lo que indica que la tensión superficial disminuye bajo esas condiciones. Caso contrario, a $\text{pH} = 3$ y a concentraciones de $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, la gota no se logra extender por completo.

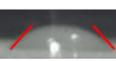
No. Muestra	Concentración - pH	Variación del ángulo de la gota.
1	4MnO - pH3	47.78° 
2	3MnO - pH3	60.18° 
3	3MnO-pH5	54.69° 
4	4MnO-pH5	37.41° 
5	4MnCl2-pH5	36.32° 
6	3MnCl2-pH5	46.52° 
7	4MnCl2-pH3	39.96° 
8	3MnCl2-pH3	86.14° 

Figura 8. Determinación del ángulo de contacto.

4. Conclusiones

Se prepararon recubrimientos de fosfato de manganeso depositados sobre sustratos de acero AISI 1020, analizando el efecto del precursor de Mn (MnO y MnCl₂), concentración de precursores (3 a 5 g-L⁻¹) y pH (1 a 5).

A pH = 1 sin importar el precursor utilizado ni su concentración se obtienen recubrimientos heterogéneos, con desprendimiento del recubrimiento y una notoria oxidación del sustrato inmediatamente de concluir la reacción de fosfatado.

A pH = 3 se obtienen recubrimientos homogéneos y sin desprendimiento del recubrimiento, sin embargo, los espesores que se obtienen se encuentran en intervalos entre 1 – 2 µm. La morfología de los recubrimientos en condiciones de pH = 3 es homogénea sobre el sustrato de acero, pero no se logra un crecimiento de los cristales de fosfato de manganeso.

A pH = 5, se obtienen recubrimientos homogéneos y sin ningún tipo de desprendimiento. Se logran espesores en promedio de 14 µm y se logra una densificación completa de cristales del fosfato de manganeso, además que el crecimiento de estos cristales se da a lo largo de todo el sustrato. El tamaño de estos cristales es de alrededor de 50 µm.

De acuerdo con los resultados de difracción de rayos X, los recubrimientos de fosfato de manganeso cristalizan en la estructura monoclinica de la fase hureaulita, del fosfato de manganeso. Con pH = 3 la intensidad de los picos es baja debido a los espesores delgados obtenidos entre 1 – 2 µm. Mientras que a un pH = 5, al tener un mayor espesor de recubrimientos (~14 µm) se logra una mayor intensidad de los planos que igualmente corresponden a la estructura monoclinica de la fase hureaulita.

De acuerdo con el análisis de varianza ANOVA usando como variable de respuesta el espesor de los recubrimientos para el diseño experimental factorial 23 se determinó que el pH es el factor que más influye en la obtención de los recubrimientos con un 66.32 %, seguido de la interacción entre

la concentración y PH con una contribución del 16.58 %, y finalmente la concentración con una contribución del 14.69 %.

Agradecimientos

Los autores agradecen los recursos e instalaciones proporcionados por la Universidad Autónoma Metropolitana para llevar a cabo la experimentación y caracterización realizadas en este trabajo.

Referencias

- Bouddouch, A., Amaterz, E., Haounati, R., Naciri, Y., Taoufyq, A., Bakiz, B., Guinneton, F., Villain, S., Gavarrí, J. R., & Benhachemi, A. (2020). Synthesis, characterization and luminescence properties of manganese phosphate Mn₃(PO₄)₂. *Materials Today: Proceedings*, 22, 16–21. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.058>
- CANACERO. (2024). *CANACERO*. <https://www.canacero.org.mx/#home>. Fecha de acceso: 22 de octubre de 2024
- Du, H., Ren, X., Pan, D., An, Y., Wei, Y., Liu, X., Hou, L., Liu, B., Liu, M., & Guo, Z. (2021). Effect of phosphating solution pH value on the formation of phosphate conversion coatings for corrosion behaviors on AZ91D. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 4(2), 401–414. <https://doi.org/10.1007/s42114-021-00222-3>
- Frost, R. L., Xi, Y., Scholz, R., López, A., & Belotti, F. M. (2013). Vibrational spectroscopic characterization of the phosphate mineral hureaulite-(Mn, Fe)₅(PO₄)₂(HPO₄)₂·4(H₂O). *Vibrational Spectroscopy*, 66, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2013.02.003>
- Galvan-Reyes, C., Fuentes-Aceituno, J. C., & Salinas-Rodríguez, A. (2016). The role of alkalinizing agent on the manganese phosphating of a high strength steel part 1: The individual effect of NaOH and NH₄OH. *Surface and Coatings Technology*, 291, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.02.012>
- Kumar, A., Bholá, S. K., & Majumdar, J. D. (2012). Microstructural characterization and surface properties of zinc phosphated medium carbon low alloy steel. *Surface and Coatings Technology*, 206(17), 3693–3699. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.02.052>
- Popić, J. P., Jegdić, B. V., Bajat, J. B., Veljović, D., Stevanović, S. I., & Mišković-Stanković, V. B. (2011). The effect of deposition temperature on the surface coverage and morphology of iron-phosphate coatings on low carbon steel. *Applied Surface Science*, 257(24), 10855–10862. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.07.122>
- Ramezanzadeh, B., Vakili, H., & Amini, R. (2015). Improved performance of cerium conversion coatings on steel with zinc phosphate post-treatment. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 30, 225–233. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.05.026>
- Shibli, S. M. A., & Chacko, F. (2011). Development of nano TiO₂ - incorporated phosphate coatings on hot dip zinc surface for good paintability and corrosion resistance. *Applied Surface Science*, 257(7), 3111–3117. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.10.125>
- Tamilselvi, M., Kamaraj, P., Arthanareeswari, M., Devikala, S., & Selvi, J. A. (2015). Development of nano SiO₂ incorporated nano zinc phosphate coatings on mild steel. *Applied Surface Science*, 332, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.01.177>
- Wang, G., Zhou, Z., Zhang, X., Zhang, K., & Wu, L. (2024). Study on the repair behavior of passive film of iron-based amorphous coatings by eco-friendly phosphate inhibitors. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 697, 134465. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFA.2024.134465>
- Zang, L., Chen, Y., Wu, Y., Zheng, Y., Chen, H., You, D., Li, L., & Li, J. (2020). Comparative tribological and friction behaviors of oil-lubricated manganese phosphate conversion coatings with different crystal sizes on AISI 52100 steel. *Wear*, 458–459, 203427. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2020.203427>