Naturaleza y TECNOLOGÍA
Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS DE POLIURETANO CON PROPIEDADES ANTICORROSIVAS

Ariadna Rebeca Camacho-Kraulles, Luis Daniel Miramontes-Espinoza, David Contreras-López*

Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Guanajuato, Gto., C.P. 36050, david.contreras@ugto.mx

Resumen

El desarrollo de recubrimientos sostenibles para la protección de superficies metálicas ha impulsado el uso de poliuretanos base agua debido a sus bajas emisiones de compuestos orgánicos volátiles y a la posibilidad de modificar sus propiedades mediante aditivos funcionales. En este trabajo se prepararon formulaciones de poliuretano con 0, 1, 2, 3 y 4 % en peso de β-ciclodextrina, empleando una formulación extendida con 1,4-butanodiol como referencia. Posteriormente, se incorporaron nanopartículas de óxido de zinc (ZnO) para evaluar su efecto sobre la capacidad protectora del recubrimiento. Las formulaciones se aplicaron sobre sustratos de acero y se caracterizaron mediante FTIR, adhesión, viscosidad y densidad, con el propósito de relacionar sus propiedades fisicoquímicas con el desempeño anticorrosivo.

La evaluación mediante inmersión en ácido nítrico 2 M mostró que las películas con ZnO conservaron en mayor medida su integridad superficial y presentaron una menor formación de productos de corrosión en comparación con las formulaciones sin nanopartículas. Este comportamiento sugiere que el ZnO incrementó el efecto barrera de la matriz polimérica al rellenar poros y microdefectos, dificultando la difusión de agua, oxígeno y iones hacia la interfaz metal–recubrimiento. Los resultados constituyen una evidencia cualitativa y preliminar del potencial de los recubrimientos de poliuretano modificados con β-ciclodextrina y ZnO para la protección anticorrosiva de superficies metálicas.

***Palabras clave**:* Poliuretano base agua; β-ciclodextrina; recubrimientos anticorrosivos.

Naturaleza y TECNOLOGÍA

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

DEVELOPMENT OF POLYURETHANE COATINGS WITH ANTI-CORROSION PROPERTIES

Abstract

The development of sustainable coatings for the protection of metallic surfaces has promoted the use of waterborne polyurethanes due to their low emissions of volatile organic compounds and the possibility of modifying their properties through functional additives. In this work, polyurethane formulations containing 0, 1, 2, 3, and 4 wt.% β-cyclodextrin were prepared, using a formulation chain-extended with 1,4-butanediol as the reference. Zinc oxide nanoparticles were subsequently incorporated to evaluate their effect on the protective performance of the coating. The formulations were applied onto steel substrates and characterized by FTIR spectroscopy, adhesion, viscosity, and density measurements to relate their physicochemical properties to their anticorrosion performance.

Evaluation by immersion in 2 M nitric acid showed that the ZnO-containing films preserved their surface integrity to a greater extent and exhibited less formation of corrosion products than the formulations without nanoparticles. This behavior suggests that ZnO enhanced the barrier effect of the matrix by filling pores and microdefects and hindering the diffusion of water, oxygen, and ions toward the metal–coating interface. These results provide qualitative and preliminary evidence of the potential of polyurethane coatings modified with β-cyclodextrin and ZnO for the anticorrosion protection of metallic surfaces.

***Keywords**:* Waterborne polyurethane; β-cyclodextrin; anticorrosion coatings

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

1. Introducción

En la actualidad los materiales poliméricos son fundamentales debido a su versatilidad, ligereza y propiedades mecánicas. Sin embargo, la exposición prolongada a humedad, radiación UV, oxígeno y agentes químicos puede deteriorar la estructura y reducir su desempeño.

Ante esta problemática, los poliuretanos base agua (WPU por sus siglas en inglés) han cobrado relevancia como una alternativa sostenible debido a sus bajas emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV), baja toxicidad y carácter no inflamable. Para optimizar el desempeño de estos recubrimientos se ha explorado la modificación de su arquitectura molecular mediante agentes de entrecruzamiento funcionales (Rosu, 2009; Zhou, 2015).

La β-ciclodextrina (β-CD), una molécula cíclica rígida en grupos hidroxilo, actúa como un agente de entrecruzamiento físico que promueve una estructura de red interconectada mediante la formación de múltiples enlaces de hidrógeno (Ningbo Inno Pharmchem Co., 2024).

Estudios previos y observaciones experimentales indican que esta densa red de interacciones secundarias no sólo mejora la cohesión del material, sino que modifica la cinética de formación de la película, favoreciendo tiempos de solidificación menores que los obtenidos con extensores de cadena lineal convencionales, como el 1,4-butanodiol (BDO).

Por otra parte, el uso de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), como reforzante en los recubrimientos, ha demostrado mejorar significativamente la resistencia a la corrosión de metales, especialmente en el acero. Debido a su tamaño nanométrico (10-100 nm), pueden dispersarse de manera uniforme en la matriz, rellenando las micro fisuras del recubrimiento WPU, reduciendo la difusión del agua, oxígeno y iones corrosivos hacia la superficie metálica, retardando significativamente su oxidación y corrosión electroquímica del sustrato (Hua, 2019; Peptu, 2022; Mucci, 2024).

La eficacia de un recubrimiento anticorrosivo no depende únicamente de su composición química, sino también de sus propiedades estructurales, mecánicas y reológicas, ya que éstas determinan la formación de una película continua, uniforme y adherente sobre el sustrato metálico (Ortiz, 2012).

En este contexto, la espectroscopía FTIR permite verificar la formación de la red de poliuretano, mientras que la adhesión y la dureza proporcionan información sobre la estabilidad mecánica y la resistencia del recubrimiento frente a esfuerzos externos. Asimismo, la viscosidad y la densidad son parámetros relacionados con la procesabilidad, homogeneidad y compactación de la matriz polimérica, características que influyen en la capacidad del recubrimiento para actuar como barrera frente a la penetración de agua, oxígeno y iones corrosivos.

Aunque diversos estudios han demostrado que la incorporación de β-CD modifica las propiedades de los poliuretanos base agua y que las nanopartículas de ZnO mejoran la protección anticorrosiva de distintos sistemas poliméricos, aún resulta de interés el efecto combinado de ambos aditivos en recubrimientos WPU destinados a la protección de sustratos metálicos (Oprea, 2013; De Luna, 2022; Mulyadi, 2026). En este contexto, el presente trabajo evalúa el comportamiento anticorrosivo de recubrimientos WPU modificados con β-CD y reforzados con nanopartículas de ZnO, relacionando su desempeño con las propiedades químicas, físicas y mecánicas del material.

2. Materiales y métodos

2.1 Obtención de poliuretano base agua

La síntesis del poliuretano base agua (WPU) se realizó en un reactor de tres bocas empleando 14.25 g de policaprolactona diol (PCL 2000) y diisocianato de isoforona (IPDI). La cantidad de IPDI se ajustó para cada formulación; es decir, 3.21 g para 0%, 3.88 g para 1%, 4.01 g para 2%, 4.19 g para 3% y 5.01 g para 4% de β-CD, manteniendo una relación molar NCO/OH de 1.10, seleccionada por encontrarse dentro del intervalo recomendado para favorecer la formación del prepolímero y obtener dispersiones acuosas estables.

La reacción se llevó a cabo bajo agitación constante de aproximadamente 700 rpm y en atmósfera de nitrógeno para eliminar la presencia de humedad, la cual puede promover reacciones secundarias de los grupos isocianato. Una vez homogeneizada la mezcla, se incorporó la β-ciclodextrina (β-CD), previamente disuelta en dimetilsulfóxido (DMSO), en

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

concentraciones de 0, 1, 2, 3 y 4% en peso respecto al contenido total de sólidos de la formulación. Se adicionó en cantidades catalíticas (tres gotas) de dilaurato de dibutilestaño (DBTDL) como catalizador a la mezcla de reacción y se mantuvo en agitación durante 2 h a 75 °C para obtener un prepolímero con grupos isocianato terminales. Posteriormente, se incorporó una solución de 2.4 g de ácido dimetilolpropiónico (DMPA) en 30 mL de acetona y la mezcla se mantuvo durante por 2 h adicionales a 75 °C con el fin de incorporar grupos carboxilo al prepolímero. A continuación, se agregaron 0.64 mL de 2-hidroxietil acrilato (HEA) y la reacción continuó durante 1 h a 75 °C para consumir los grupos isocianato remanentes.

Finalmente, se adicionaron 2.5 mL de trietilamina (TEA) como agente neutralizante y la mezcla se mantuvo durante 30 min a la misma temperatura. Antes de la emulsificación, la acetona se eliminó por evaporación. Posteriormente, se añadieron 50 mL de agua destilada gota a gota bajo agitación a 60 °C, incrementando la velocidad de agitación hasta aproximadamente 1050 rpm para favorecer la formación de la dispersión acuosa.

La formulación se diseñó para alcanzar un contenido nominal de sólidos cercano al 30 %; durante la etapa de dispersión se observó separación de fases, como se discute posteriormente.

2.2 Síntesis de nanopartículas de óxido de zinc

Se preparó una solución al 0.8% de acetato de zinc di-hidratado en 400 mL de isopropanol. De manera simultánea, se preparó una solución al 0.5 M de hidróxido de sodio en 50 mL de isopropanol. Se colocó la solución de acetato en un matraz Erlenmeyer y se añadió agitación magnética a 600 rpm.

La solución de hidróxido de sodio se añadió gota a gota con ayuda de una bureta mientras se mantenía la agitación hasta alcanzar un pH de 9. Una vez alcanzado el pH, el matraz se colocó en un baño precalentado a 60 °C manteniendo la agitación a 600 rpm durante 1 hora. Finalizando el tiempo de reacción se dejó enfriar el matraz antes de sumergirlo en un baño de agua fría con la finalidad de que no hubiera un choque térmico. Se transfirió la suspensión a tubos Falcon de 15 mL; estos tubos se centrifugaron a 4500 rpm durante 30 min para separar las nanopartículas de la fase líquida.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

Después de la centrifugación se decantó el líquido sobrenadante y se recuperaron las nanopartículas de los tubos. Las nanopartículas se transfirieron a un crisol y se colocaron en un horno de convección a 60 °C durante 12 horas para eliminar restos de solvente y humedad. Finalmente, se les realizó una molienda a las nanopartículas en un mortero de ágata hasta obtener un polvo fino y homogéneo.

2.3 Preparación de películas para caracterización

Un extracto de la fase orgánica recuperada de las diferentes concentraciones de β-CD se disolvió en acetona para obtener una solución con apariencia gelatinosa. Esta solución se dejó secando en placas de acero por 24 h para obtener una película endurecida de acuerdo con lo que especifica la norma ASTM International (2022).

2.4 Pruebas de viscosidad

La viscosidad de las formulaciones se determinó con un viscosímetro rotacional Scientific® VE-85 a aproximadamente 25 °C. Se prepararon diluciones de 1 g de matriz polimérica en 25 mL de acetona para las formulaciones con 0, 1, 2, 3 y 4 % de β-CD. Las mediciones se realizaron una vez estabilizada la lectura, empleando 30 rpm para las muestras. Se efectuaron dos lecturas consecutivas por muestra.

2.5 Pruebas de densidad

La densidad de las diluciones se determinó por picnometría a aproximadamente 25 °C, empleando un picnómetro de 25 mL previamente seco. Para cada formulación se diluyó 1 g de matriz polimérica en 25 mL de acetona. La densidad se calculó a partir de la masa neta de la dilución, obtenida por diferencia entre el peso del picnómetro lleno y vacío, y el volumen conocido del recipiente.

2.6 Diseño experimental y tratamiento de los datos

Para cada formulación con contenidos de 0, 1, 2, 3 y 4 % en peso de β-ciclodextrina se realizaron las evaluaciones experimentales por duplicado.

Debido al carácter exploratorio del estudio y al número limitado de réplicas, los resultados se analizaron mediante estadística descriptiva y no se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales. Por esta razón, las diferencias observadas entre las formulaciones se interpretaron como tendencias experimentales y no como diferencias

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

estadísticamente significativas. En las pruebas de adhesión, debido al carácter ordinal de la clasificación ASTM D3359 (0B–5B), las dos determinaciones se reportaron individualmente. Para las variables cuantitativas de viscosidad y densidad se presentan los valores experimentales obtenidos como parámetros descriptivos de las formulaciones.

La evaluación frente al medio corrosivo se realizó igualmente por duplicado y su interpretación se mantuvo como una evaluación cualitativa preliminar basada en el estado superficial de las probetas.

2.7 Pruebas de corrosión

Para las pruebas de corrosión se evaluaron dos condiciones experimentales: la primera correspondió a recubrimientos WPU sin incorporación de nanopartículas de óxido de zinc (ZnO), mientras que la segunda incluyó la adición de ZnO (agregando 0.1 % en peso con respecto a la matriz polimérica, dispersándolo vía sonicación por 15 minutos.

La matriz polimérica se diluyó en acetona para facilitar la dispersión de las nanopartículas). En ambos casos se evaluaron las formulaciones con contenidos de β-CD de 0, 1, 2, 3 y 4 % en peso. Para cada condición experimental se prepararon 500 mL de una solución de ácido nítrico (HNO_3) 2M empleando agua destilada como solvente.

Las probetas de acero se colocaron en vasos de precipitados y se sumergieron completamente en la solución corrosiva. Las muestras con y sin ZnO permanecieron en inmersión durante 48 h, ambas a temperatura ambiente. Posteriormente, se realizó una inspección visual del estado de los recubrimientos y de la presencia de productos de corrosión.

3. Resultados y discusión

3.1 Obtención del poliuretano

Durante la síntesis de las formulaciones con diferentes contenidos de β-ciclodextrina se mantuvieron constantes las condiciones de reacción. Sin embargo, durante la etapa de adición de agua se observó un incremento considerable de la viscosidad, acompañado de separación de fases y dificultad para obtener una dispersión acuosa homogénea. Este comportamiento se presentó tanto en la formulación de referencia como en las muestras modificadas con β-ciclodextrina.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

La inestabilidad observada pudo estar relacionada con diversos factores del proceso, entre ellos la elevada viscosidad del prepolímero, el grado de neutralización del DMPA, la velocidad de incorporación del agua y las interacciones generadas por la β-ciclodextrina. Aunque los reactivos fueron purificados previamente y la síntesis se realizó bajo atmósfera de nitrógeno, la separación de fases persistió.

A pesar de ello, fue posible recuperar la fase polimérica y preparar películas continuas sobre los sustratos de acero, las cuales se utilizaron para evaluar su adhesión y comportamiento frente al medio corrosivo.

3.2 Espectroscopia infrarroja

Los espectros FTIR de las formulaciones con diferentes concentraciones de β-ciclodextrina mostraron las bandas características de la matriz de poliuretano. Se identificaron señales asociadas con los grupos uretano, así como con los enlaces C=O, N–H, C–O–C y C–H presentes en la estructura polimérica.

La incorporación de β-ciclodextrina produjo cambios en la región correspondiente a los grupos hidroxilo, relacionados con la presencia de múltiples grupos O–H en su estructura. Estos grupos pueden establecer interacciones mediante enlaces de hidrógeno con los grupos uretano de la matriz, favoreciendo una mayor cohesión entre los componentes del recubrimiento.

La comparación de los espectros muestra un comportamiento similar entre las distintas formulaciones, conservándose las principales señales correspondientes a la estructura del poliuretano.

En las formulaciones que contienen β-CD, la presencia de bandas asociadas con grupos hidroxilo es consistente con la incorporación de este componente y con la posibilidad de establecer interacciones por enlace de hidrógeno con los grupos uretano de la matriz.

Además, en ninguno de los espectros se observó la banda característica de grupos isocianato libres alrededor de 2260 cm^{-1}, lo que indica que los grupos NCO reaccionaron en gran medida durante la síntesis del poliuretano (ver Figuras 1 a 5).

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

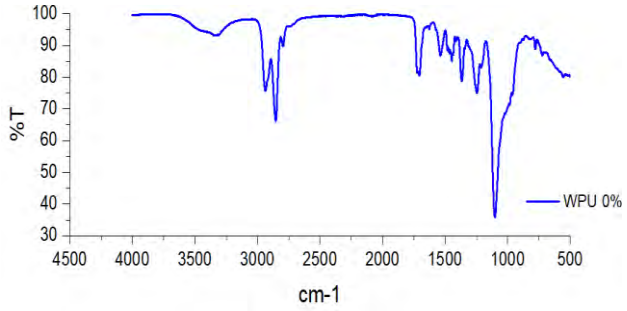


Figura 1. Espectro FTIR de la muestra de WPU con 0% de β-CD

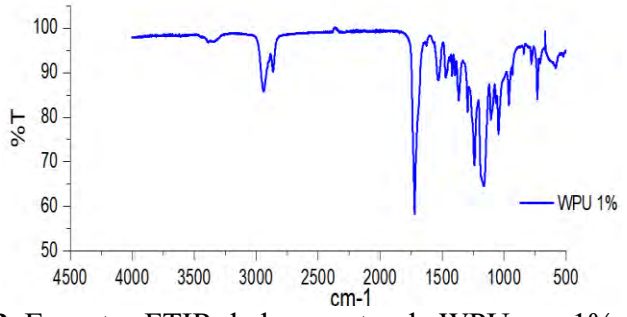


Figura 2. Espectro FTIR de la muestra de WPU con 1% de β-CD

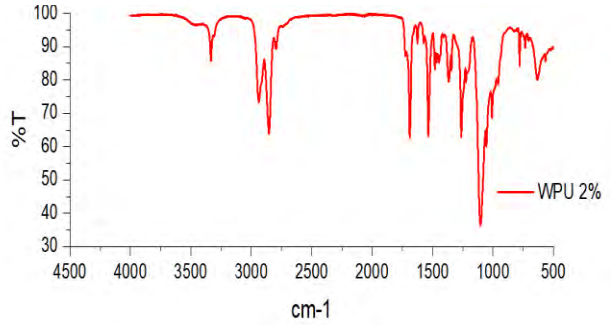


Figura 3. Espectro FTIR de la muestra de WPU con 2% de β-CD

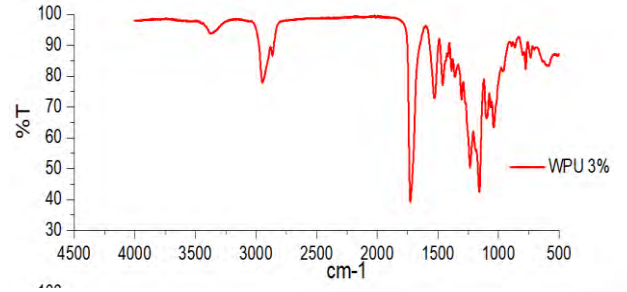


Figura 4. Espectro FTIR de la muestra de WPU con 3% de β-CD

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

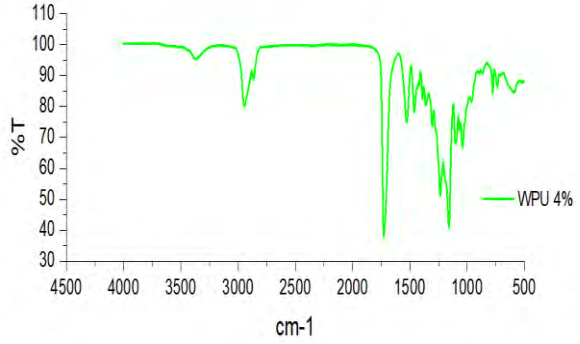


Figura 5. Espectro FTIR de la muestra de WPU con 4% w/w de β-CD

3.3 Propiedades físicas y adhesión sobre acero

La adhesión de los recubrimientos sobre acero fue evaluada por duplicado mediante el método B de ASTM D3359. Como se muestra en la Tabla 1, las formulaciones con 3 y 4 % de β-CD presentaron las clasificaciones más altas.

Para 3 % de β-CD se obtuvieron valores de 3B y 4B, mientras que la formulación con 4 % alcanzó 4B y 5B. En contraste, las formulaciones con 0, 1 y 2 % presentaron clasificaciones entre 0B y 2B. Estos resultados muestran una tendencia hacia una mayor permanencia de la película sobre el sustrato metálico al incrementar el contenido de β-CD, particularmente a concentraciones de 3 y 4 %. Debido al número de réplicas y al carácter ordinal de la escala ASTM D3359, los resultados se presentan individualmente y no se realizó un análisis estadístico inferencial.

La viscosidad de las formulaciones mostró una modificación marcada con la incorporación de β-CD.

Tabla 1. Valores de adhesividad utilizando la escala ASTM D3359 con diferentes porcentajes de β-CD

β-CD (% p/p)	**Réplica 1**	**Réplica 2**
0	0B	1B
1	2B	2B
2	1B	0B
3	3B	4B
4	4B	5B

En la Tabla 2 se presenta la formulación control con un valor de 1.29 cP, mientras que la formulación con 1 % de β-CD alcanzó 103.5 cP. Para contenidos de 2, 3 y 4 % se registraron valores de 204.7, 206.2 y 206.8 cP, respectivamente.

Estos resultados indican que la incorporación de β-CD modifica la resistencia al flujo de las formulaciones, probablemente debido al incremento de las interacciones intermoleculares asociadas con los grupos hidroxilo disponibles en su estructura. Asimismo, las determinaciones por picnometría mostraron que la dilución correspondiente a la formulación control presentó una densidad de 0.7363 g/mL.

La incorporación de 1 % de β-CD incrementó este valor hasta 0.7784 g/mL, mientras que las formulaciones con 2, 3 y 4 % presentaron valores de 0.7659, 0.7676 y 0.7500 g/mL, respectivamente. Es importante señalar que los valores corresponden a diluciones preparadas con 1 g de matriz polimérica en 25 mL de acetona y, por tanto, no representan la densidad intrínseca del poliuretano.

Tabla 2. Viscosidad y densidad promedio de las formulaciones empleadas como recubrimiento sobre acero

β-CD (% p/p)	**Viscosidad (cP)**	**Densidad de la dilución (g/mL)**
0	1.29	0.7363
1	103.5	0.7784
2	204.7	0.7659
3	206.2	0.7676
4	206.8	0.7500

En conjunto, los resultados muestran que la incorporación de β-CD modificó las propiedades físicas de las formulaciones y el comportamiento de adhesión sobre acero.

Las formulaciones con 3 y 4 % de β-CD presentaron las mayores clasificaciones de adhesión, mientras que las mediciones de viscosidad evidenciaron una mayor resistencia al flujo respecto a la formulación control.

Las variaciones observadas en la densidad de las diluciones también sugieren cambios en la organización de las formulaciones al modificar el contenido de β-CD.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato

3.4 Evaluación preliminar del comportamiento anticorrosivo

Después de la inmersión en una solución de ácido nítrico 2 M, las probetas recubiertas mostraron diferencias visibles en el grado de deterioro superficial. En las formulaciones sin nanopartículas de ZnO se observó un efecto apreciable de corrosión y una pérdida más evidente de la integridad del recubrimiento. En contraste, las películas que contenían ZnO conservaron en mayor medida su continuidad y presentaron una menor degradación superficial en el sustrato.

Las Figuras 6-8 muestran el estado de las barras de acero recubiertas antes y después del ensayo de inmersión.



Figura 6. Prueba barras de acero en el tiempo 0 con WPU/β-CD sumergidas en el HNO_3 2M.



Figura 7. Prueba barras de acero con WPU/β-CD sumergidas en el HNO_3 2M después de 48 horas de exposición. De izquierda a derecha 0, 1, 2, 3 y 4 % de β-CD.

Número Especial "Verano de la Investigación DCNE 2026"
ISSN 2007-672X
Universidad de Guanajuato



Figura 8. Resultado de pruebas de corrosividad en barras de acero con WPU/β-CD/ZnO sumergidas en HNO_3 2M después de 48 horas de exposición. De izquierda a derecha 0, 1, 2, 3 y 4 % de β-CD.

Como se puede apreciar, las formulaciones sin nanopartículas presentaron una mayor formación visible de productos de corrosión, así como un deterioro más evidente de la película. En contraste, las muestras modificadas con ZnO conservaron en mayor medida la continuidad e integridad superficial del recubrimiento, lo que sugiere una mayor capacidad de protección frente al medio agresivo.

Como señalan Ortiz y Gil (2012), los recubrimientos poliméricos protegen los metales principalmente mediante la formación de una barrera física que limita el contacto entre el sustrato y el medio corrosivo. Sin embargo, la presencia de poros, microgrietas, discontinuidades o regiones con baja adhesión puede facilitar la penetración del electrolito y favorecer el inicio de las reacciones de corrosión.

En el presente trabajo, la menor degradación observada en las películas con ZnO puede relacionarse con la incorporación de las nanopartículas dentro de la matriz de poliuretano, donde podrían ocupar microdefectos y generar una estructura más compacta y continua.

El comportamiento observado sugiere que la incorporación de nanopartículas de ZnO favoreció el efecto barrera del recubrimiento. Las nanopartículas pueden ocupar poros y microdefectos dentro de la matriz polimérica, generando una trayectoria más compleja para la difusión del agua y de las especies presentes en el medio corrosivo. Como resultado, se puede retrasar el contacto entre

el electrolito y la interfaz metal con recubrimiento. No obstante, este mecanismo se plantea como una posible explicación y no fue verificado directamente mediante análisis de la distribución de las nanopartículas o de la morfología de las películas.

Cabe mencionar que la adhesión del recubrimiento también constituye un factor relevante para la protección del acero, debido a que una película continua y bien adherida reduce la presencia de zonas expuestas al medio agresivo.

En este sentido, las formulaciones con 3 y 4 % de β-ciclodextrina mostraron los mejores valores de adhesión sobre el sustrato metálico. Sin embargo, los resultados disponibles no permiten establecer de forma cuantitativa cuál concentración de β-CD presentó la mayor resistencia a la corrosión, debido a que la evaluación se realizó principalmente mediante observación visual.

En conjunto, los resultados representan una evidencia cualitativa preliminar de que la incorporación de ZnO puede mejorar la capacidad protectora de los recubrimientos de poliuretano. Para confirmar esta tendencia será necesario realizar ensayos con tiempos de exposición iguales, incluir réplicas y aplicar técnicas electroquímicas, como espectroscopía de impedancia electroquímica y curvas de polarización, que permitan cuantificar la resistencia del recubrimiento y la velocidad de corrosión.

4. Conclusiones

La incorporación de β-ciclodextrina permitió modificar las propiedades de las formulaciones de poliuretano obtenidas. La caracterización por FTIR mostró las bandas características de la matriz de poliuretano y la ausencia de la señal asociada con grupos isocianato libres alrededor de 2260 cm^{-1}, lo que indica que los grupos NCO reaccionaron en gran medida durante la síntesis. Asimismo, la presencia de β-CD fue consistente con un incremento de las interacciones intermoleculares dentro de la matriz.

Las propiedades físicas y de adhesión también fueron afectadas por el contenido de β-CD. Las formulaciones con 3 y 4 % presentaron las mejores clasificaciones de adhesión sobre acero, alcanzando valores de hasta 5B, mientras que las mediciones de viscosidad y densidad evidenciaron cambios en el comportamiento de las formulaciones respecto al control. En conjunto, estos resultados sugieren que contenidos mayores de β-CD favorecen la formación de películas

con mejor permanencia sobre el sustrato metálico.

La incorporación de nanopartículas de ZnO favoreció la conservación de la integridad superficial del recubrimiento durante la exposición al medio corrosivo. Las muestras modificadas con ZnO presentaron una menor formación visible de productos de corrosión y un menor deterioro de la película en comparación con las formulaciones sin nanopartículas. Este comportamiento sugiere que el ZnO contribuye a mejorar el efecto barrera de la matriz, probablemente al dificultar la penetración de especies corrosivas hacia la interfaz metal/recubrimiento.

En conjunto, los resultados muestran que la combinación de β-ciclodextrina y nanopartículas de ZnO tiene potencial para el desarrollo de recubrimientos de poliuretano destinados a la protección de superficies metálicas. No obstante, debido al carácter exploratorio del estudio y a que la evaluación anticorrosiva fue principalmente cualitativa, será necesario complementar estos resultados con un mayor número de réplicas, tiempos de exposición equivalentes y técnicas electroquímicas que permitan cuantificar la resistencia del recubrimiento y confirmar la formulación con mejor desempeño.

5. Referencias bibliográficas

ASTM International. (2022). *ASTM D3359-22: Standard test methods for rating adhesion by tape test.* ASTM International. https://doi.org/10.1520/D3359-22

Kim, B. K., Lee, S. Y., & Xu, M. (2009). Hydrogen bonding and crystallization in biodegradable poly(ester urethane) copolymer. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 47(10), 935–943. https://doi.org/10.1002/polb.21674

Ningbo Inno Pharmchem Co., LTD (2024). *La ciencia de la dispersión del óxido de zinc en polímeros: Fabricante líder, Nbinno*. https://www.nbinno.com/es/ARTICULO/otros/ciencia-dispersion-oxido-zinc-polimeros-fabricante-lider

Peptu, C., Diaconu, A.-D., Danu, M., Peptu, C. A., Cristea, M., & Harabagiu, V. (2022). The influence of the hydroxyl type on crosslinking process in cyclodextrin-based polyurethane networks. *Gels*, 8(6), 348. https://doi.org/10.3390/gels8060348

Rosu, D., Rosu, L., & Cașcaval, C. N. (2009). IR change and yellowing of polyurethane as a result of UV irradiation. *Polymer Degradation and Stability*, 94(4), 591–596. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.01.013

Hua, Y., Li, X., Ma, L., Wang, Y., Fang, H., Wei, H., & Ding, Y. (***2019***). Self-healing mineralization and enhanced anti-corrosive performance of polyurethane CaCO3 composite film via β-CD induction. *Materials & Design*, 177, 107856. https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2019.107856

Mucci, V. L., Hormaiztegui, M. E. V., Amalvy, J. I., & Aranguren, M. I. (2024). Formulation, structure and properties of waterborne polyurethane coatings: A brief review. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(4), 489–516. https://doi.org/10.1080/01694243.2023.2240587

Oprea, S., & Potolinca, V. O. (2013). Synthesis and characterization of linear and cross-linked cyclodextrin polyurethane elastomers. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 52(15), 1550–1556. https://doi.org/10.1080/03602559.2013.824463

Zhou, X., Li, Y., Fang, C., Li, S., Cheng, Y., Lei, W., & Meng, X. (2015). Recent advances in synthesis of waterborne polyurethane and their application in water-based ink: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 31(7), 708–722. https://doi.org/10.1016/j.jmst.2015.03.002

Xiao, L., Shi, J., Wu, K., & Lu, M. (2020). Self-healing supramolecular waterborne polyurethane based on host–guest interactions and multiple hydrogen bonds. *Reactive and Functional Polymers*, 148, 104482. https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104482

De Luna, M. S. (2022). Recent Trends in Waterborne and Bio-Based Polyurethane Coatings for Corrosion Protection. *Advanced Materials Interfaces*, 9(11). https://doi.org/10.1002/admi.202101775

Ortiz, B., & Gil, L. (2012). *Comportamiento corrosivo de distintas aleaciones metálicas. En X Jornadas de Investigación*. Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO). https://poz.unexpo.org/postgrado/descargas/

XJornada/Metalurgia/IM02.%20COMPORTAMIENTO%20CORROSIVO%20DE%20DISTINTAS%20ALEACIONES%20METALICAS.pdf

Mulyadi, B., Aisyah, S. N., Fiddaroini, S., Masruroh, M., Wulandari, I. O., Prananto, Y. P., Hashim, N., & Sabarudin, A. (2026). Surfactant-modified ZnO NPs enhance the corrosion barrier performance of PLA coatings on AA2024-T3 aluminum alloy. *Results in Chemistry*, 13, 103358. https://doi.org/10.1016/j.rechem.2026.103358