

# Obtaining semi-flexible polyurethane composites with shape memory

Obtención de compositos de poliuretano semiflexible, con memoria de forma

Domínguez Saldaña Fernando Antonio<sup>1</sup>, Pérez Rodríguez Alexa Iraís<sup>1</sup>, Varela Figueroa Gabriel Omar<sup>1</sup>, Ramírez Alcantar Alondra Jocelyn<sup>1</sup>, De Loera Chávez Gerado Hernán<sup>1</sup>, García Larios Elisa Fernanda<sup>1</sup>, Ramírez Nieto José de Jesús<sup>1</sup>, Cisneros González Oswald Emiliano<sup>1</sup>, Fuentes Ramirez Rosalba<sup>1</sup>, Contreras López David<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato

\* david.contreras@ugto.mx

## Resumen

Buscar, innovar y mejorar materiales poliméricos que sean amigables con el medio ambiente, además de que no contaminen ni alteren la fauna ni flora natural, así como de mejorar sus propiedades químicas y mecánicas si es posible, para esto se han buscado nuevas rutas de síntesis para hacer recubrimientos poliméricos, de los más destacables que se puede mencionar son los poliuretanos de base agua (WPU), lamentablemente este material por sí solo es un material poco resistente con tendencia a la poca durabilidad debido a su naturaleza. En este artículo se mostrará la obtención de un nanocomposito  $\beta$ -Ciclodextrina en la matriz polimérica y se obtuvo en dos porcentajes (2% w/w y 4% w/w) con el propósito de analizar el comportamiento que este presenta cuando se modifica su arquitectura molecular del material polimérico, a las películas poliméricas se les hicieron pruebas de autorreparación, fuerza, dureza, así mismo se realizaron mediciones para determinar su precisión, viscosidad y densidad de la matriz polimérica. Para finalizar se usaron técnicas de caracterización de análisis FT-IR con el propósito de analizar y comprobar sus efectos positivos para el mejoramiento de recubrimientos poliméricos.

**Palabras clave:** poliuretano, recubrimiento,  $\beta$ -Ciclodextrina, pruebas, autorreparación.

## Antecedentes

No podríamos imaginar la vida sin materiales poliméricos, se han vuelto parte de nuestro día a día. Los polímeros están formados por muchas moléculas pequeñas llamadas monómeros, estas se entrelazan entre sí para formar cadenas más largas, se utilizan en gran variedad de productos y bienes que usamos cotidianamente (Namazi, 2017)

Los materiales que ordinariamente se nombran "plásticos" son un tipo de polímeros creados con el objetivo de cubrir una función básica, comúnmente son productos desechables con un tiempo de vida útil reducido. Esto debido a que, durante su utilización los polímeros son expuestos a fenómenos externos como agresiones ambientales que alteran las propiedades mecánicas iniciales de los materiales. (Willcoq, 2020)

Por ello, se busca mejorar las propiedades mecánicas, la adherencia e incrementar las propiedades de resistencia a la corrosión mediante la adición de nanopartículas en la matriz polimérica. El  $\text{CeO}_2$  es un material que ha generado interés para incorporarse en películas de recubrimiento debido a su variedad de aplicaciones como bloqueadores UV, sensores de oxígeno, e inhibidores de corrosión. (Ferrel, 2015)

La síntesis de un poliuretano es llevada a cabo a partir de una reacción exotérmica de moléculas que contienen al menos dos grupos isocianato ( $\text{N}=\text{C}=\text{O}$ ) con moléculas que poseen átomos activos de hidrógeno, los polioles son los más comunes y contiene entre dos y ocho grupo hidroxilo (OH). Las características del poliuretano dependen del tipo de isocianato (aromático o alifático) y polio (poliéter o poliéster) utilizados. Pueden ser espumas flexibles y rígidas, elastómeros termoestables y termoplásticos, adhesivos, recubrimientos, sellantes, fibras, tintas y materiales compuestos. (Quintero, Gómez & Boyaca, 2007)

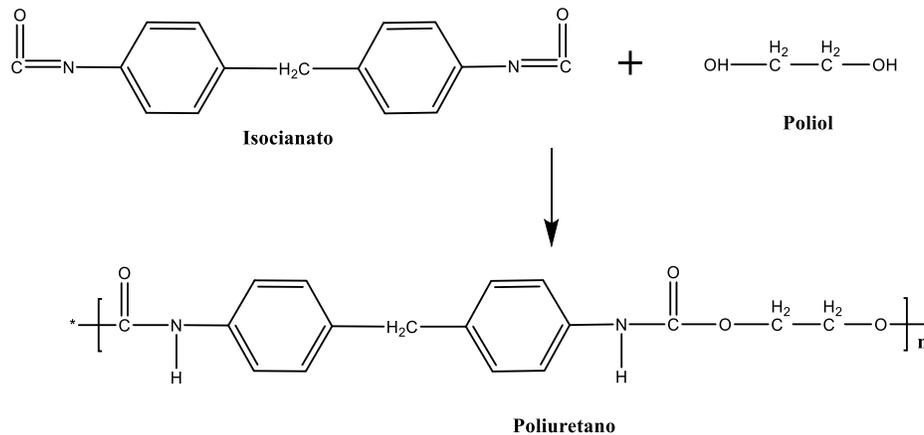


Figura 1. Reacción de polimerización para la obtención de poliuretano.

Dentro de la gama de materiales poliméricos, los poliuretanos afines al agua (WPU) (Wan & Chen, 2018) han tomado especial importancia debido a su característica de protección al medio ambiente. Son materiales versátiles utilizados en gran diversidad de áreas debido a que no son tóxicos, ni inflamables y no contaminan el aire ya que carecen o tienen muy pocos compuestos orgánicos volátiles (Ferrel, 2015)

Debido a la versatilidad presentada en los materiales WPU ha habido un incremento en la demanda de estos, razón por la que se generó la estrategia de crear un poliuretano con propiedades mejoradas y autorregenerativos, de manera que mejore el tiempo de vida útil de los materiales. (Wan & Chen, 2018) Con el objetivo de aumentar las propiedades del WPU, se añaden ciclodextrinas (CD) a su formulación.

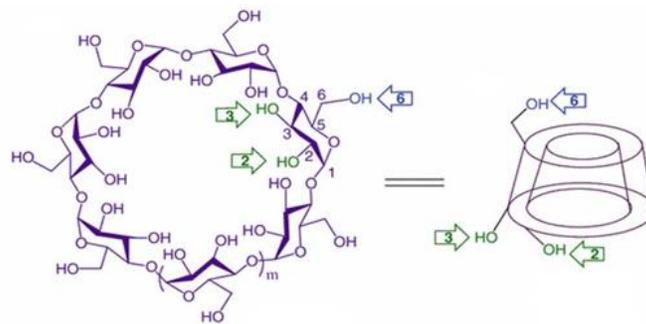


Figura 2. Estructura de las ciclodextrinas, especificando grupos hidroxilos primarios y secundarios.

Las CDs presentan la forma de cono truncado, como se observa en la Figura 2, con una cavidad hidrofóbica en el interior y una cavidad hidrofílica en el exterior. Esto se debe a que las funciones hidroxilo de las moléculas de glucosa se encuentran orientadas hacia el exterior del cono presentando los hidroxilos secundarios. Mientras que en la parte interior del anillo se encuentra el esqueleto carbonado. Se nombran como  $\alpha$ -CD y  $\beta$ -CD cuando presentan 6 y 7 unidades de glucopiranosas, respectivamente. (García, 2015) Además, el  $\beta$ -CD también controla la estructura del polímero WPU y promueve la estructura de red interconectada del mismo. (Hua y otros, 2019)

La síntesis de WPUs y  $\beta$ -ciclodextrina ( $\beta$ -CD) con la adición de nanopartículas de  $\text{CeO}_2$  presentan potencial para mejorar con éxito las propiedades tanto mecánicas como químicas de los WPUs, Una de las aplicaciones más relevantes de la adición de nanopartículas de  $\text{CeO}_2$  son como protectoras de la corrosión en metales. (Ferrel, 2015) Se ha reportado la influencia de las NPs de  $\text{CeO}_2$  en la resistencia a la radiación UV de una laca de PU. (Saadat-Monfares y otros, 2012).

Las propiedades generales del recubrimiento resultante son determinadas por el tamaño de las nanopartículas, su forma y la concentración en el polímero (Aguilar, 2021) Existen diversas maneras de incorporar las nanopartículas a las matrices poliméricas, entre ellas se encuentran el método coloidal, método

sol-gel, adsorción iónica. (Zanella, 2012) Para el proceso de obtención del PU con nanopartículas de  $\text{CeO}_2$  se optó por el método sol-gel. Entre las motivaciones para usar el proceso sol-gel están la alta pureza, el tamaño pequeño y homogéneo de las partículas. (Pérez, 2016).

## Metodología

### *Síntesis de poliuretano*

Para la síntesis de la matriz polimérica base a usar, se utiliza el procedimiento presentado por Hua, Y. (Hua, et al., 2019) el cual ocurre mediante el uso de IPDI, PCDL,  $\beta$ -CD, DMPA y HEA. Se hizo reaccionar el isocianato con el alcohol, en este caso isoforona y DMPA, posteriormente se le añadió  $\beta$ -CD y el catalizador, DBTL, en este punto se obtiene un prepolímero, una vez logrado este, se adicionó el HEA, el cual reaccionó con el grupo NCO residual al final de las cadenas del prepolímero. En este punto se añadió TEA como agente neutralizante, a fin de ionizar los grupos carboxílicos de las moléculas de DMPA en la cadena del polímero. Finalmente, se incorporó agua destilada, para emulsionar y después se eliminó la acetona residual por medio de destilación a presión constante.

Una vez obtenida nuestra matriz polimérica (WPU) emulsionada, se realizaron diferentes tipos de pruebas con el fin de medir las diferentes propiedades del WPU y cuáles son sus características principales.

#### Pruebas de adhesión

La prueba de adhesión se realizó con base a la norma de los Métodos de Prueba Estándar para medición de adhesión por prueba de cinta (Designación: D3359-17) la cual hace referencia a dos tipos de métodos diferentes. Debido a los materiales con los que se contó en el laboratorio de trabajo se escogió el método "B" (Cross-cut tape test). Para llevar a cabo la realización de la prueba, se colocaron películas en láminas de distintos materiales los cuales fueron madera, vidrio, acrílico y metal.

El método de aplicación consistió en colocar una pequeña cantidad de nuestra matriz polimérica en las láminas y se arrastró a lo largo de las mismas, con el fin de cubrirlas por completo. Posteriormente se dejaron secar por completo alrededor de 24 horas. Una vez que las láminas se encontraron completamente secas, se realizaron 6 incisiones horizontales y 6 verticales que intercepten una con la otra el centro de la lámina. Por último, se sobrepuso una tira de cinta en las incisiones realizada y se contabilizó 1 minuto para finalmente retirarla de manera fuerte y rápida con el propósito de probar con certeza su adherencia con el material (siendo 0B el menor y 5B la mayor adherencia posible).

#### Pruebas de viscosidad

Estas pruebas fueron realizadas con un viscosímetro de Brookfield, el cuál posee 4 tipos de agujas diferentes dependiendo el fluido a analizar. En un frasco se colocó el WPU con el fin de almacenarlo para su medición. Posteriormente, se hizo la instalación del equipo completo y se ajustó la primera aguja. Se realizaron las mediciones correspondientes a diferentes velocidades. Se repitió el proceso para las 4 agujas. Los datos recabados fueron utilizados para la realización del modelo matemático con el que se obtuvieron los datos de viscosidad.

#### Pruebas de corrosión

Las pruebas de corrosión consistieron en realizar una solución en medio salino la cual simuló el ambiente corrosivo a las que las estructuras marinas se encuentran. La composición de la solución fue realizada al 20% w/w con sal para cocina. Para medir la corrosión, se ingresaron 6 láminas de metal al medio salino, 4 cubiertas con WPU y 2 sin recubrimiento (muestras de control). Se dejaron pasar 24 horas desde que fueron ingresadas y se compararon las láminas que poseían el recubrimiento y las muestras de control.

#### Pruebas de autorreparación

Para llevar a cabo esta prueba, se colocó nuestro WPU en láminas de diferentes materiales (madera, acrílico, vidrio y metal). Se dejaron secar aproximadamente 24 horas en el horno con el fin de que la cobertura en las láminas fuera manejable. Una vez las coberturas estuvieran totalmente secas, se procedió a realizar cortes transversales a las mismas, con el fin de obtener rompimiento notorio de la película. Finalmente se dejaron de un alrededor de 8-10 días bajo una lámpara de luz UV. Se monitoreó el proceso de las coberturas cada día.

## Resultados

Pruebas de reológicas y de densidad

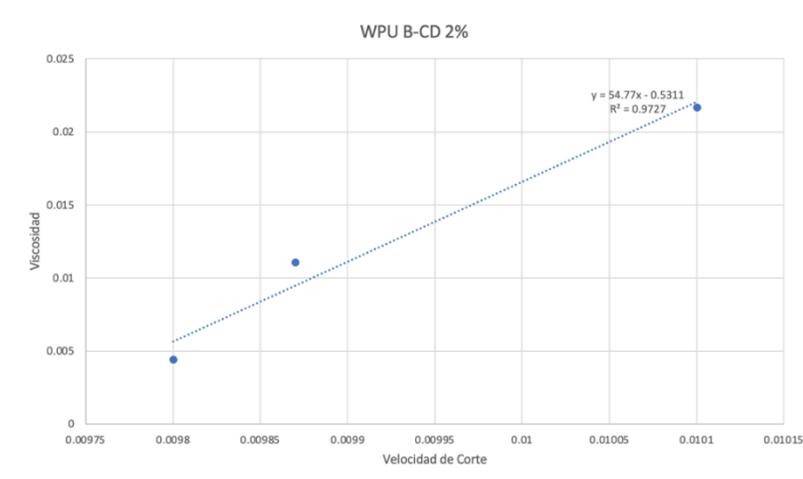
Se realizaron pruebas con un viscosímetro rotacional; se utilizaron agujas de diámetro variable, y se ajustó la velocidad en un rango de 0.3 a 60 rpm, con el objetivo de analizar el perfil reológico del poliuretano sintetizado. Las pruebas se realizaron tanto para la muestra con el 2%  $\beta$ -CD de tanto como para aquella con el 4%  $\beta$ -CD. Se dio tratamiento numérico en Excel y se modeló de acuerdo al modelo de la Ley de las Potencias, generándose una gráfica que muestra la variación de la viscosidad con la velocidad de corte. Los resultados obtenidos se muestran a continuación.

**Tabla 1.** Perfil reológico del WPU-2 $\beta$ -CD

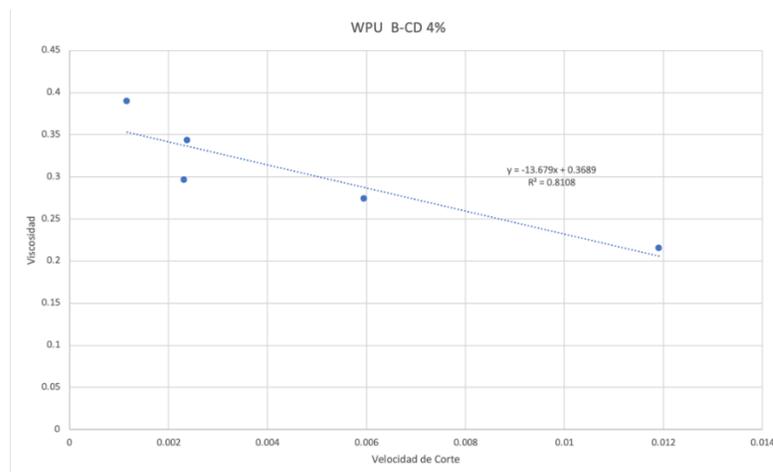
Velocidad de Corte (m/s)	Viscosidad (mPa*s)
0.0044	0.0098
<b>0.0111</b>	0.00987
<b>0.0217</b>	0.0101

**Tabla 2.** Perfil reológico del WPU-4 $\beta$ -CD

Velocidad de Corte (m/s)	Viscosidad (mPa*s)
0.0012	0.3902
0.0023	0.2964
0.0024	0.3438
0.0059	0.2742
0.0119	0.2155



**Gráfica 3.** Perfil reológico del WPU-2β-CD



**Gráfica 4.** Perfil reológico del WPU-4β-CD

Se observó un perfil reológico distinto para las concentraciones de β-CD, tratándose de un fluido dilatante la emulsión al 2%, y de un fluido pseudoplástico la emulsión al 4%.

Adicionalmente, se realizaron pruebas con un picnómetro de 5ml para determinar la densidad de las emulsiones con ambos porcentajes de β-CD, a temperatura constante de 25 °C. Se obtuvieron los resultados siguientes:

**Tabla 3.** Resultados de pruebas de densidad para WPU según el porcentaje de β-CD

Porcentaje de β-CD	Densidad (g/ml)
2%	1.037
4%	1.0196

Pruebas de adhesividad

Una vez realizadas las pruebas de adhesión siguiendo los pasos de la norma “Métodos de prueba estándar para medición de adhesión por prueba de cinta” bajo el método “B” se obtuvieron los siguientes resultados para el WPU 2%:

**Tabla 4.** Resultados de pruebas de adhesión para WPU-2β-CD

Material	No. de Lámina	Adhesión
Madera	1	5B
Madera	2	5B
Vidrio	1	2B
Vidrio	2	5B
Metal	1	5B
Metal	2	5B
Acrílico	1	3B
Acrílico	2	5B

**Tabla 5.** Resultados de pruebas de adhesión para WPU-4β-CD

Material	No. de lámina	Adhesión
Madera	1	5B
Madera	2	5B
Vidrio	1	5B
Vidrio	2	5B
Metal	1	0B
Metal	2	0B
Acrílico	1	3B
Acrílico	2	3B

Podemos observar que nuestro WPU 2% presenta mejor adhesión en materiales como el metal y acrílico en comparación con WPU al 4%, pero presentó menor adhesión en materiales como el vidrio en comparación con nuestra segunda emulsión.

#### Pruebas de corrosión

Para la determinación de la protección a ambientes corrosivos que nuestro WPU puede otorgar se realizó la prueba que a continuación se describe: En un recipiente con una solución salina de 23% w/w se introdujeron una serie de láminas metálicas al mismo tiempo. Dichas láminas fueron intervenidas por medio de un corte realizado de esquina a esquina que permitiría a la solución penetrar en nuestra pieza de metal. A su vez, dichas piezas fueron recubiertas con nuestro polímero en las zonas circundantes a los cortes descritos para poder analizar el efecto de dispersión de la corrosión y si las películas poliméricas resultaban eficientes para frenarla y dar una mayor vida útil a estos materiales.



**Imagen 1.** Preparación de las láminas intervenidas para las pruebas de corrosión



**Imagen 2.** Cortes realizados en las pruebas con el polímero del 2% (izquierda) con los cortes realizados en las pruebas con el polímero del 4%.

En la Imagen 1 podemos observar nuestras láminas control separadas del lado izquierdo de la figura, acompañadas de las láminas protegidas por el WPU del 2%  $\beta$ -CD del lado superior y las del 3%  $\beta$ -CD del lado inferior. Se puede observar los cortes realizados para que la corrosión comience a esparcirse desde ese punto de la pieza. Las láminas fueron dejadas en la solución salina por un período de 24 horas antes de su extracción.



**Imagen 3.** Placas de prueba después del período de 96 horas. Del lado izquierdo se encuentra la del 2% y del lado derecho la del 4%.

Al analizar las piezas metálicas de la imagen 3 podemos ver que existió una corrosión considerable en los cortes realizados, teniendo cierto grado de dispersión en los sitios donde se encuentra la protección polimérica. Sin embargo, podemos ver que partes de la lámina aún se encuentran protegidas y que la corrosión se encuentra en una etapa inicial, en comparación con la que se encuentra dentro de las rajaduras realizadas. Si lo analizamos con la imagen del control mostrado en la imagen 4 podemos ver que, si existió una protección de esparcimiento de la corrosión a partir de las rajaduras hechas, obteniendo mejores resultados en la sección derecha inferior de la placa del WPU del 4%. Si bien, si existe una protección a la corrosión, podemos ver que ya existe una cantidad considerable de corrosión al pasar solamente 96 horas. Si se pudiera realizar un compuesto con nanopartículas de algún tipo, como podrían ser de zinc o de cerio, se pudiera tal vez mejorar estas propiedades.



**Imagen 4.** Progresión de la corrosión en la placa control

#### Pruebas de autorreparación

Después de 5 días a las que las láminas fueron expuestas a la luz UV, se logró ver de forma concreta que los cortes realizados desaparecieron casi en su totalidad, y en un mayor porcentaje en la base de acrílico. Se favoreció la auto reparación gracias a la exposición a la luz UV, la cual indujo a que los radicales de nuestra cadena polimérica volvieran a sus uniones originales.



**Imagen 5.** Cortes realizados a la lámina de metal



**Imagen 6.** Cortes realizados a lamina de vidrio.



**Imagen 7.** Cortes a la lámina de acrílico.

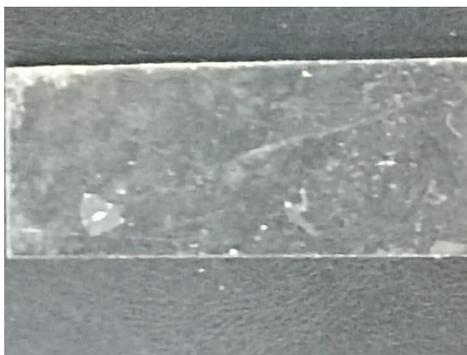


**Imagen 8.** Cortes a la lámina de madera.



**Imagen 9.** Coberturas expuestas a luz UV.

Una vez que se expusieron durante los 5 días completos, se pudieron observar las reparaciones que la luz UV promovió en las coberturas puestas en nuestras láminas. Se tuvo mejores resultados en el WPU 4%  $\beta$ -CD el cual promovió de una manera más notoria la reparación de los cortes, restaurándolos casi en su totalidad.



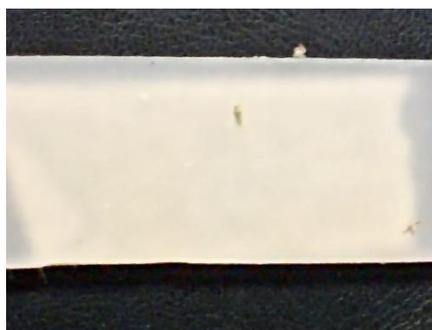
**Imagen 10.** Cobertura en base vidrio parcialmente reparada.



**Imagen 11.** Cobertura en base metal totalmente reparada.



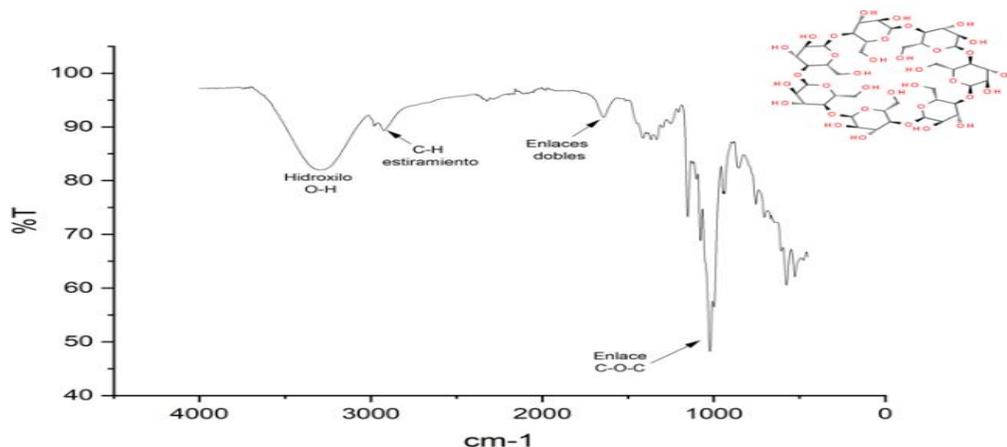
**Imagen 12.** Cobertura base madera parcialmente reparada



**Imagen 13.** Cobertura base acrílico totalmente reparada.

Espectros IR

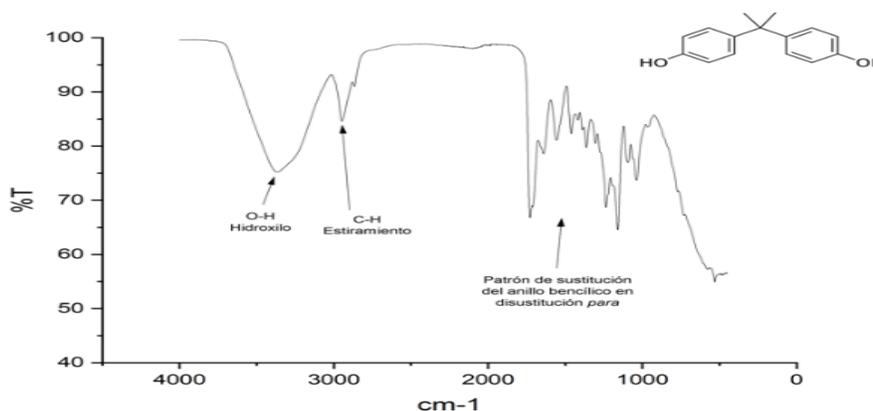
### ***β-ciclodextrina***



**Imagen 14.** Espectro IR de  $\beta$ -CD

El primer pico presente entre los  $4000\text{ cm}^{-1}$  y los  $2000\text{ cm}^{-1}$  se le atribuye a la presencia de grupos hidroxilo presente en la estructura de los anillos de la beta-ciclodextrina. El pico siguiente muestra los enlaces de C-H de estiramiento entre los  $3000\text{ cm}^{-1}$  y los  $2500\text{ cm}^{-1}$ . Los enlaces de oxígenos se muestran en la sección de enlaces dobles entre los  $2000\text{ cm}^{-1}$  y los  $1500\text{ cm}^{-1}$ . Finalmente, la última sección nos muestra los picos de la huella dactilar de la molécula, el más notorio se da casi a los  $1000\text{ cm}^{-1}$ , en donde nos da evidencia del enlace C-O-C presente en los anillos de la molécula de la  $\beta$ -CD.

### ***BPA (Bisfenil)***



**Imagen 15.** Espectro IR de BPA

La muestra de BPA nos da un primer pico entre los  $3500\text{ cm}^{-1}$  y los  $3000\text{ cm}^{-1}$  perteneciente al grupo hidroxilo, su gran tamaño es evidencia de la presencia de dos grupos hidroxilo de la molécula. El pico que se encuentra casi en los  $3000\text{ cm}^{-1}$  indica la presencia de enlaces de C-H de estiramiento, los cuales se observan en los metilos que se encuentran sustituidos en el carbono cuaternario que une los dos anillos benzénicos de nuestra molécula. Los últimos picos, ubicados entre los  $2000\text{ cm}^{-1}$  y los  $1000\text{ cm}^{-1}$  nos dan la huella digital de nuestro componente, el comportamiento de los picos indica la evidencia de anillos benzénicos que se encuentran sustituidos en la posición *para* en el anillo.

### ***Diol de policaprolactona***

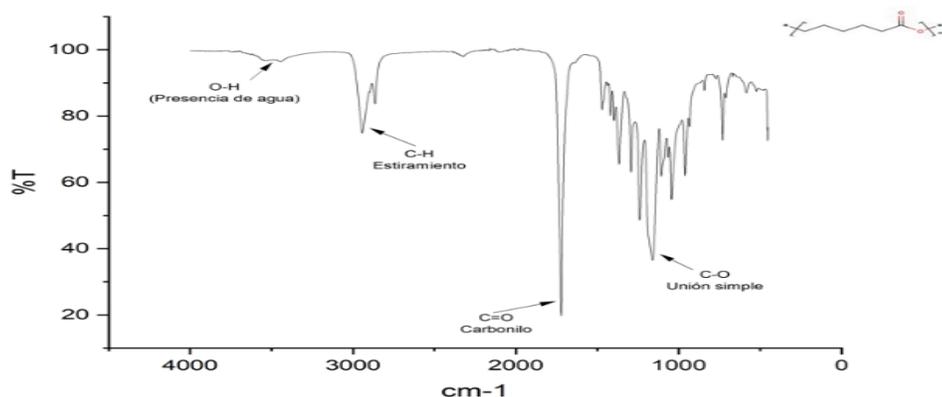


Imagen 16. Espectro IR de Diol de policaprolactona

Existe un pequeño pico entre los  $3500\text{ cm}^{-1}$  y los  $3000\text{ cm}^{-1}$  que denota la presencia de agua residual en el componente; dado a que no existe un enlace hidroxilo en la molécula podemos descartar que este forma parte de la estructura. Posteriormente se tiene un pico grande entre los  $3000\text{ cm}^{-1}$  y los  $2500\text{ cm}^{-1}$  que nos indican los enlaces C-H de estiramiento de la molécula. Entre los  $2000\text{ cm}^{-1}$  y los  $1500\text{ cm}^{-1}$  se tiene el pico más grande que se le denota al enlace carbonilo presente en la molécula. Finalmente, entre los  $1500\text{ cm}^{-1}$  y los  $1000\text{ cm}^{-1}$  tenemos la huella digital del compuesto que nos muestra un pico de un enlace simple C-O, presente también en la sección del carbonilo del compuesto.

#### Diisocianato de Isoforona (IPDI)

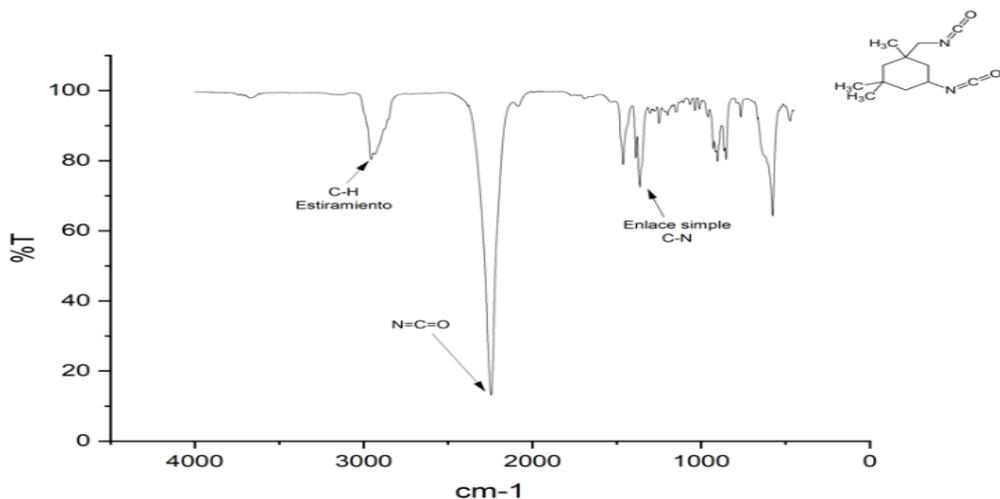


Imagen 17. Espectro IR de IPDI

En el espectro de IPDI se tiene un pico pronunciado entre los  $3000\text{ cm}^{-1}$  y los  $2500\text{ cm}^{-1}$  que nos muestra los C-H de estiramiento presentes en las sustituciones del anillo de la molécula. Por otro lado, el mayor pico en nuestro espectro se encuentra entre los  $2500\text{ cm}^{-1}$  y los  $2000\text{ cm}^{-1}$  el cual nos da nuestro enlace de  $\text{N}=\text{C}=\text{O}$  característico de nuestra molécula. A su vez, también existe evidencia de enlaces entre el carbono y el nitrógeno, teniendo un pico entre los  $1500\text{ cm}^{-1}$  y los  $1000\text{ cm}^{-1}$  que muestra evidencia del enlace C-N presente en los dos carbonos terciarios del anillo.

Comparación entre los WPU con diferentes concentraciones de  $\beta$ -CD.

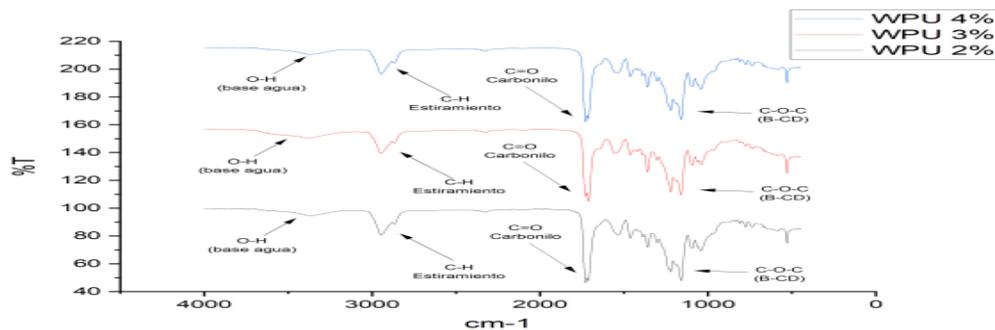


Imagen 18. Espectro IR de WPU a diferentes porcentajes de  $\beta$ -CD

Nuestra matriz polimérica presenta un pequeño pico en el grupo hidroxilo, este se encuentra entre los  $3500\text{ cm}^{-1}$  y los  $3000\text{ cm}^{-1}$ ; dado a que el polímero es un poliuretano a base de agua aquí se muestra la evidencia de la presencia de esta. A su vez, se muestran los C-H de estiramiento entre los  $3000\text{ cm}^{-1}$  y los  $2500\text{ cm}^{-1}$ . Se tiene un pico característico que denota el grupo carbonilo de nuestra molécula, entre los  $2000\text{ cm}^{-1}$  y los  $1500\text{ cm}^{-1}$ . En la sección final podemos ver otro pico característico del enlace C-O-C; sin embargo, este se debe a la presencia de la  $\beta$ -CD con la que se enriqueció nuestra matriz polimérica. Este se encuentra entre los  $1500\text{ cm}^{-1}$  y los  $1000\text{ cm}^{-1}$  y se encuentra ligeramente más pronunciado en nuestra matriz del 4%; esto se debe al ligero aumento del porcentaje de la  $\beta$ -CD.

## Conclusiones

Existieron complicaciones al momento de tratar de sintetizar poliuretano a partir de otros diisocianatos, mostrándose el producto siempre insoluble en agua. Concluimos a partir de esto que el IPDI es el mejor candidato a prestarse para la síntesis. Al variar la concentración de  $\beta$ -CD, se observaron cambios significativos en la viscosidad y la densidad del producto obtenido; aunque las pruebas de densidad no mostraron la variación, se llegó a la conclusión de que la muestra con el 4%, a pesar de haber sido más densa a la vista, tenía mucho aire en el picnómetro, lo que contribuyó a disminuir la densidad. Fue claro, por otro lado, que el perfil reológico fue distinto.

Las pruebas de adhesividad mostraron los resultados esperados. La muestra con el 2% se presentó como la más adhesiva en casi todos los materiales de prueba, a excepción del vidrio. Por otro lado, la consistencia de la muestra con el 4% la volvió inviable como adhesivo en metal. En los demás materiales, esta última mostró una adhesividad promedio.

Se probó que prevendría la corrosión en metal, pues en tan solo un día de prueba ya se observaba una diferencia clara entre la zona de corte y la zona con el WPU, tanto para el 4% como para el 2%. Cabe mencionar, sin embargo, que se determinó que, a largo plazo, ambos recubrimientos comenzaban a desprenderse por sí solos. Se comprobó también, tras la exposición prolongada a luz UV, que pequeños cortes en madera, vidrio, metal y acrílico se reparaban. Se atribuye este fenómeno al enriquecimiento con  $\beta$ -CD de la matriz polimérica.

## Bibliografía/Referencias

- Ferrel, A. (2015). Desempeño electroquímico y óptico de recubrimientos de poliuretano reforzados con nanopartículas de óxido de Cerio ( $\text{CeO}_2$ ) utilizando diferentes sustratos. Instituto Politécnico Nacional.
- Namazi, H. (2017). Polymers in our daily life. *Bioimpacts*, 7(2), 73-74.
- Willcoq, B. O.-M. (2020). Advances in intrinsic self-healing polyurethanes and related composites. *RSC Advances*, 10, 13766-13782.

- Wan, T., & Chen, D. (2018). Preparation of  $\beta$ -cyclodextrin reinforced waterborne polyurethane nanocomposites with excellent mechanical and self-healing property. *Composites Science and Technology*.
- Quintero, M., Gómez, J. & Boyaca, A. (2007) Los polímeros de Poliuretano. *Palmas*, 28, 35-42.
- García, A., (2015). Desarrollo y caracterización de sistemas transportadores de ingredientes farmacéuticos activos poco solubles e agua. Aplicación de diseños experimentales". Universidad Nacional de Rosario.
- 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  $\text{CaCO}_3$  composite film via  $\beta$ -CD induction. *Materials and Design*, 1-10.
- Saadat-Monfared, A., Mohseni, M. & Tabatabaei, M. (2012) Colloids surfaces a physicochem. *Eng. Asp.* 408, 64-70.
- Zanella, R. (2012) Metodologías para la síntesis de nanopartículas: controlando forma y tamaño. *Mundo nano*. 5 (1). 1-13.
- Pérez, I. (2016) Obtención de materiales por el método de sol-gel a base de  $\text{CeO}_2$  y  $\text{ZrO}_2$ . Instituto Politécnico Nacional
- Libretexts. (2022). 11.4: Interpretación de Espectros IR. Retrieved from [https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica\\_Org%C3%A1nica/Mapa%253A\\_Qu%C3%ADmica\\_Org%C3%A1nica\\_%28Wade%29/11%253A\\_Espectroscopia\\_Infrarroja\\_y\\_Espectrometr%C3%ADa\\_de\\_Masas/11.04%253A\\_Interpretaci%C3%B3n\\_de\\_espectros\\_IR](https://espanol.libretexts.org/Quimica/Qu%C3%ADmica_Org%C3%A1nica/Mapa%253A_Qu%C3%ADmica_Org%C3%A1nica_%28Wade%29/11%253A_Espectroscopia_Infrarroja_y_Espectrometr%C3%ADa_de_Masas/11.04%253A_Interpretaci%C3%B3n_de_espectros_IR)
- (N.d.). Retrieved from <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/743/1/Cap%206%20Análisis%20de%20os%20espectros%20de%20infrarrojo.pdf>
- Ullah, R., Ahmad, I., & Zheng, Y. (2016). Fourier transform infrared spectroscopy of "Bisphenol a." Retrieved from <https://www.hindawi.com/journals/jspec/2016/2073613/>