

<https://doi.org/10.22201/iim.rma.2026.8.175>

NÚMERO 8 | enero-junio 2026

ISSN: En trámite

Pag. 66-69

Polímeros autorreparables: Método de síntesis, propiedades y aplicaciones

Rosaura Velázquez Ramírez¹, Mikhail G. Zolotukhin^{1*}, Enoc Cetina Mancilla¹,
Beatriz Torrestiana-Sánchez², María Ortencia González Díaz³, Ricardo Vera Graziano¹
1. Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México 04510
2. Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Veracruz, Av. M.A. de Quevedo 2779, Col. Formando Hogar, Veracruz, Ver., 91897, México.
3. Centro de Investigación Científica de Yucatán CICY, Calle 43 No. 130 x 32 y 34, Chuburná de Hidalgo; CP 97205, Mérida, Yucatán, México.
zolotukhin@iim.unam.mx

Resumen

Los “polímeros autorreparables” son capaces de recuperar por completo sus propiedades (físicas y mecánicas) de forma autónoma o en respuesta a estímulos externos (calor, radiación o presión) después de sufrir algún daño. Estos polímeros tienen una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias, incluyendo la textil, la electrónica, la automotriz, la aeroespacial, la salud y la biomedicina; su capacidad para recuperar sus propiedades tras sufrir daños los hace ideales para aplicaciones en las que la durabilidad y el rendimiento son críticos. Recientemente, en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM, se sintetizaron tres nuevos polímeros con la propiedad de ser intrínsecamente autorreparables, utilizando un nuevo método de síntesis llamado poli-hidroxi-alquilación no estequiométrica catalizada por superácidos (PNESA). La estructura química de los polímeros sintetizados se corroboró mediante análisis de espectroscopía infrarroja y resonancia magnética nuclear, y se identificó que los múltiples grupos funcionales obtenidos

están relacionados con el proceso de autorreparación. Actualmente, el mercado de estos materiales se encuentra en crecimiento y está impulsado por empresas líderes en tecnología. Estos materiales representan una innovación importante en el campo de los materiales inteligentes debido a su alta versatilidad y utilidad, por lo que es vital mantener la investigación y el desarrollo de los polímeros autorreparables.

Palabras clave:

Polímeros, autorreparación, materiales inteligentes

Introducción

Los polímeros son en la actualidad ampliamente usados gracias a sus bajos costos de producción, su bajo peso molecular y su buen aislamiento térmico. Sus aplicaciones incluyen embalajes para alimentos, textiles, recubrimientos, dispositivos médicos y materiales de construcción, entre otros. Sin embargo, durante su fabricación (o posteriormente) se les pueden generar defectos y/o daños, los cuales reducen la vida útil del polímero y su desempeño,

provocando así la ruptura del material [1,2]. En algunos casos, sería posible reparar el área dañada, no obstante, esto sería únicamente una solución temporal y con limitaciones debido a que no se recuperan sus características físicas ni mecánicas [3]. En respuesta, la investigación científica se ha enfocado en el desarrollo de materiales poliméricos autorreparables.

El concepto de “polímeros autorreparables” surgió en la década de 1980 [3] y se definió como polímeros capaces de recuperar por completo sus propiedades (físicas y mecánicas) de forma autónoma o en respuesta a estímulos externos (calor, radiación o presión) tras sufrir algún daño [4].

Tipos de polímeros autorreparables

Existen dos tipos de polímeros autorreparables: extrínsecos o intrínsecos. A grandes rasgos, los polímeros autorreparables del tipo extrínseco (**Fig. 1a**) se fabrican desde el inicio con material curativo incorporado; contienen dos sustancias encapsuladas por separado que, al ocurrir una fractura del material, reaccionarán y unirán nuevamente la zona dañada. Sin embargo, los polímeros del tipo extrínseco presentan el inconveniente de que el grado de reparación estará limitado por la cantidad de material curativo añadido al momento de su fabricación, y en algunos casos, si el daño ocurre en una zona sin material curativo, no habrá autorreparación [5-8].

Por otro lado, la autorreparación intrínseca (**Fig. 1b**) se basa en la formación de nuevos enlaces covalentes y/o en fuertes interacciones electrostáticas dentro de la estructura química del material, capaces de unir el sitio de ruptura [5-8].

Recientemente, en el Instituto de Investigaciones en Materiales (IIM) de la UNAM, se sintetizaron tres nuevos polímeros con la propiedad de

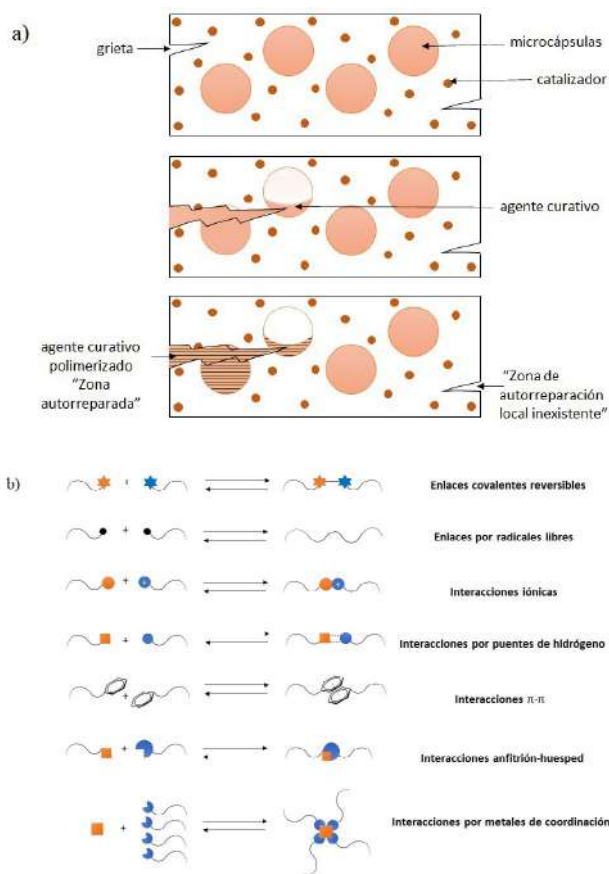


Fig. 1. Métodos de autorreparación (a) extrínseca y (b) intrínseca.

autorreparación del tipo intrínseca, mediante un nuevo método de síntesis, la polihidroxiálquilación no estequiométrica catalizada por superácidos (PNESA) [9].

La PNESA es una reacción de polimerización destacada por la obtención de polímeros en un solo paso, a temperatura ambiente y sin recurrir a metales. Además, este método conduce a altos rendimientos de reacción y a la obtención de polímeros con más de un grupo funcional en su estructura química final.

Propiedades de los polímeros autorreparables sintetizados por PNESA

La estructura química de los polímeros fue corroborada mediante análisis de espectroscopía infrarroja y resonancia magnética nuclear, y se identificó que los múltiples grupos funcionales

obtenidos son de gran importancia, ya que están relacionados con el proceso de autorreparación. Actualmente, la investigación se encuentra activa y se busca evidencia experimental que permita proponer específicamente las interacciones entre los diferentes grupos funcionales, a fin de mejorar la comprensión del fenómeno. Las estructuras químicas de los tres sistemas pueden observarse en la **Fig. 2**, donde además se mencionan las funcionalidades químicas presentes.

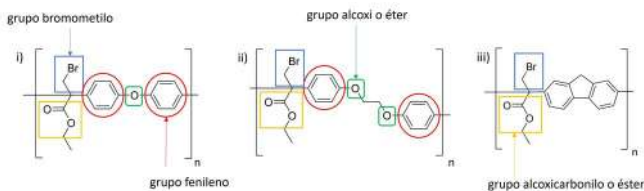


Fig. 2. Nuevas estructuras químicas sintetizadas por PNESA que presentan autorreparación intrínseca.

Los polímeros obtenidos en el IIM-UNAM, se clasifican como polímeros autorreparables intrínsecos-no autónomos, es decir, que no se adicionan agentes curativos pero que sí requieren de un estímulo externo para activar el proceso de autorreparación.

El estímulo utilizado para estos polímeros consiste en hinchar el material con un disolvente adecuado; al hacerlo, el aumento del volumen permite que las cadenas del polímero se muevan con mayor libertad y así difundan al sitio dañado para formar uniones que reparen el material. Finalmente, ocurre la evaporación del disolvente y el material recupera sus propiedades físicas y químicas tras la reparación. Este efecto podría considerarse similar o análogo al de la elevación de la temperatura [6]. La eficacia de la autorreparación intrínseca de estos polímeros bajo hinchamiento se demostró mediante cortes finos en una película polimérica observada al microscopio, utilizando acetato de etilo como disolvente de hinchamiento. (**Fig. 3**). Puede verse que, independientemente de la

zona donde se realice el corte, el polímero es capaz de recuperar sus propiedades originales.

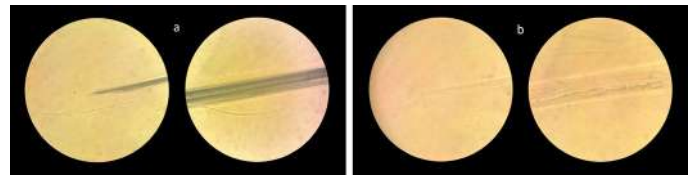


Fig. 3. Ejemplo de autorreparación por hinchamiento en una membrana del sistema polimérico. (a) Membrana con corte inicial: zona lateral (izquierda) y zona central (derecha). (b) Membrana tras la autorreparación: zona lateral (izquierda) y zona central (derecha).

Algunos ejemplos de polímeros autorreparables intrínsecos actualmente disponibles en el mercado incluyen: poliuretano con enlaces de hidrógeno, vitrímeros epoxi, elastómeros con enlaces de disulfuro y redes iónicas reversibles. Estos se aplican en recubrimientos flexibles, electrónica flexible, adhesivos, piezas impresas 3D e hidrogeles médicos y su durabilidad es elevada, ya que son estables a largo plazo mientras no se degraden los grupos funcionales [5].

Conclusiones

Los polímeros autorreparables tienen una amplia gama de aplicaciones en diversas industrias, incluyendo textil, electrónica, automotriz, aeroespacial, salud y biomedicina; su capacidad para recuperar sus propiedades tras sufrir daños los hace ideales para aplicaciones en las que la durabilidad y el rendimiento son críticos. Además, hoy en día, el mercado de estos materiales se encuentra en crecimiento y está impulsado por empresas líderes en tecnología [4,7,8,10]. Estos materiales representan una innovación importante en el campo de los materiales inteligentes, debido a su alta versatilidad y utilidad, por lo que haber desarrollado en el IIM-UNAM un método de síntesis de estos polímeros, que en un solo paso permite obtener altos rendimientos en la reacción, ofrece un potencial para la explotación de esta tecnología a nivel comercial en nuestro país.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología CONAHCYT por el Proyecto Ciencia de Frontera 140617, y por las becas otorgadas al Dr. Enoc Cetina (CVU 660995) y a la M. en C. Rosaura Velázquez (CVU 1046177). De igual forma, a la DGAPA-UNAM por los proyectos PAPIIT IN204923 e IG200423 y al TNM Proyecto AS-2-140/2024.

Referencias

- [1] C. R. Ratwani, A. R. Kamali, and A. M. Abdelkader, "Self-healing by Diels-Alder cycloaddition in advanced functional polymers: A review," *Prog Mater Sci*, vol. 131, pp. 1–30, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.pmatsci.2022.101001.
- [2] D. Y. Wu, S. Meure, and D. Solomon, "Self-healing polymeric materials: A review of recent developments," *Progress in Polymer Science (Oxford)*, vol. 33, no. 5, pp. 479–522, May 2008, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2008.02.001.
- [3] B. Aïssa, D. Therriault, E. Haddad, and W. Jamroz, "Self-healing materials systems: Overview of major approaches and recent developed technologies," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2012, pp. 1–17, 2012, doi: 10.1155/2012/854203.
- [4] J. Xie, P. Yu, Z. Wang, and J. Li, "Recent Advances of Self-Healing Polymer Materials via Supramolecular Forces for Biomedical Applications," *Biomacromolecules*, vol. 23, no. 3, pp. 641–660, Mar. 2022, doi: 10.1021/acs.biomac.1c01647.
- [5] N. Wen et al., "Recent advancements in self-healing materials: Mechanicals, performances and features," *React Funct Polym*, vol. 168, pp. 1–23, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2021.105041.
- [6] S. Burattini, B. W. Greenland, D. Chappell, H. M. Colquhoun, and W. Hayes, "Healable polymeric materials: A tutorial review," *Chem Soc Rev*, vol. 39, no. 6, pp. 1973–1985, May 2010, doi: 10.1039/b904502n.
- [7] C. Wang et al., "High-performance self-healing composite ultrafiltration membrane based on multiple molecular dynamic interactions," *J Memb Sci*, vol. 671, pp. 1–13, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.memsci.2023.121395.
- [8] Md. W. Rahman and N. Rahman Shefa, "Minireview on Self-Healing Polymers: Versatility, Application, and Prospects," *Advances in Polymer Technology*, vol. 2021, pp. 1–12, 2021, doi: 10.1155/2021/7848088.
- [9] M. T. Guzmán-Gutiérrez et al., "Dramatic enhancement of superacid-catalyzed polyhydroxyalkylation reactions," *Macromolecules*, vol. 44, no. 2, pp. 194–202, Jan. 2011, doi: 10.1021/ma102267f.
- [10] N. Z. Tomić, A. N. Mustapha, M. AlMheiri, N. AlShehhi, and A. Antunes, "Advanced application of drying oils in smart self-healing coatings for corrosion protection: Feasibility for industrial application," *Prog Org Coat*, vol. 172, pp. 1–25, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.porgcoat.2022.107070.