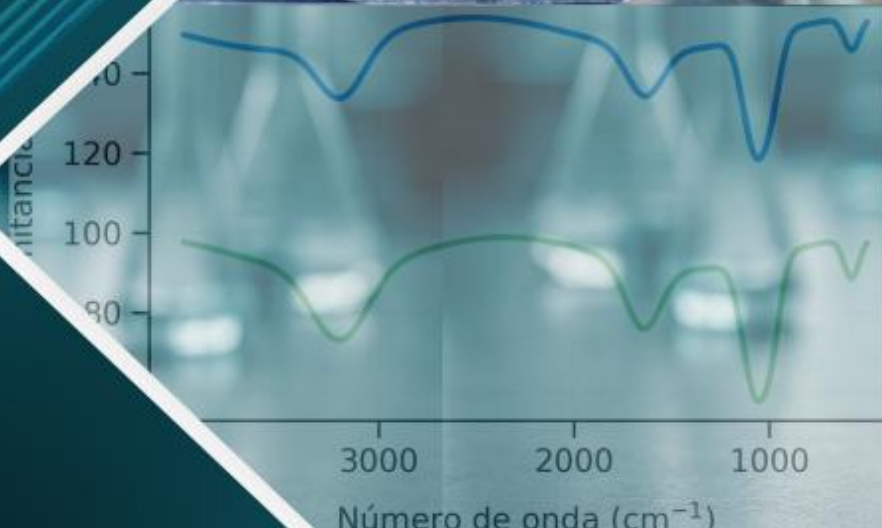


# JEEOS

JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING  
OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY

## 2026



Vol. 10 Núm. 1 (2026)

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo

No. 01-2016-050908471400-203. ISSN: 2448-8186





## DIRECTORIO

**L.D. GUILLERMO NARVÁEZ OSORIO**  
Rector

**DR. WILFRIDO MIGUEL CONTRERAS SÁNCHEZ**  
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

**DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ GOVEA**  
Secretario de Servicios Académicos

**LIC. ALEJANDRINO BASTAR CORDERO**  
Encargado del Despacho de la Secretaría de  
Servicios Administrativos

Esta revista está citada en:

Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal LATINDEX.<http://www.latinindex.unam.mx/> JOURNAL OF ENERGY, ENGINEERING OPTIMIZATION AND SUSTAINABILITY, Vol 10, No. 1, Año 2026, es una publicación continua editada por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040, <https://revistajeeos.ujat.mx/JEEOS/es/>, Email: [jeeos@ujat.mx](mailto:jeeos@ujat.mx). Indizada en LATINDEX. Editora responsable: Laura Lorena Díaz Flores. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2016-050908471400-203, ISSN: 2448-8186, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número: Pauly González Mayo, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 30 de abril 2026.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution- NonCommercialShareAlike 4.0 International License.

Dra. Laura Lorena Díaz Flores  
**EDITORA EN JEFE**

MSI. Alva del Rocío Pulido Téllez  
**GESTORA**

M.A. Pauly González Mayo Dra. Antonia del Rocío López Guemez  
**ASISTENTE EDITORIAL Y MAQUETADO**

MIS Dalia Exaltación Medina Mandujano MAEE. Mary Cruz Valenzuela Jiménez  
**ASISTENTE DE DISEÑO Y ESTILO**

MC Sulma Guadalupe Gómez Jiménez MC Sirleni Ordóñez Frías  
**ASISTENTE DE TRADUCCION**

### **EDITORES ASOCIADOS POR ÁREA**

Dra. Angélica del Carmen Lizardo Pérez

M en C en Arq. Margarita del Carmen Noguera Miceli

Dra. Haydee Pérez Castro

Dr. Luis Manuel López Manrique

Dra. Karla María Aguilar Castro

Dr. Edgar Vicente Macias Melo

Dr. José de los Santos López Lázaro

Dra. Lizeth Rojas Blanco

Dr. Erik Ramírez Morales

M. C. Cristina Ponce Parra

Dr. Reymundo Ramírez Betancour

Dr. Emmanuel Munguía Balvanera

Dr. René Sebastián Mora Ortiz

## COMITÉ EDITORIAL

Dr. Bassam Ali, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán

Dr. Fabricio Nápoles Rivera, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo**

Dr. Francisco López Villareal, **Instituto Tecnológico de Villahermosa.**

Dr. Fernando Israel Gómez Castro, **Universidad de Guanajuato**

Dr. Juan Serrano Arellano, **Instituto Tecnológico de Pachuca**

Dra. Isabel María Valdivia Fernández, **Universidad de la Habana- Facultad de Geografía**

Dra. Ivett Zavala Guillén, **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California**

Dr. Luis Alfonso García Cerda, **Centro de Investigación de Química Aplicada**

Dra. Nancy del Pilar Medina Herrera, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Ma. Guadalupe Garnica Romo, **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

Dra. María Guadalupe Alpuche Cruz, **Universidad de Sonora**

Dr. Pedro Cruz Alcantar, **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**

Dr. Salvador Tututi Ávila, **Universidad Autónoma de Nuevo León**

Dra. Santa del Carmen Herrera Sánchez, **Universidad Autónoma del Carmen**

## Índice Vol. 10 Núm. 1 (2026)

<b>Mezcla asfáltica a base de residuos de construcción y demolición para caminos rurales de Tabasco</b>	<b>1-22</b>
Solís-Cortazar D. <sup>1</sup> , González-García E. <sup>2</sup> , Solís-Cortazar JC. <sup>1</sup> , Pérez-Castro H. <sup>1*</sup>	
<b>Estrategia educativa: prototipo de microgasificador para el aprovechamiento de residuos sólidos y biomasa</b>	<b>23-30</b>
Venegas-Sánchez J.A. <sup>1</sup> , Muñoz-Barron B. <sup>2</sup> , Jiménez-Hernández G. <sup>1</sup>	
<b>Avances en el desarrollo en recubrimientos autorreparable</b>	<b>31-46</b>
Domínguez-De Los Santos F.J. <sup>1</sup> , Gómez-Álvarez F.J. <sup>1</sup> , Rojas-Blanco L. <sup>1</sup> , Escalante-Pérez M.E. <sup>1</sup> , Ramírez-Morales E. <sup>1*</sup>	
<b>Sustratos de oro en el desarrollo de biosensores para la seguridad alimentaria: avances y perspectivas</b>	<b>47-62</b>
Sánchez-Rangel D.C. <sup>1</sup> De León-Santillán A. <sup>2</sup> , Barrera-Martínez C.L. <sup>3</sup> , Arredondo-Valdés R. <sup>1</sup> , Laredo-Alcalá E.I. <sup>1*</sup>	
<b>Valorización de residuos: <math>\text{feso}_4 \cdot \text{xh}_2\text{o}</math> obtenido de alambre de neumáticos fuera de uso para el tratamiento fenton de agua con diclofenaco</b>	<b>63-74</b>
González-Ybarra J. <sup>1</sup> , Martínez-Sánchez C. <sup>2</sup> , Alanís-Navarro J.A. <sup>3</sup> , Alarcón-Hernández F.B. <sup>4</sup> , Albarrán-Fuentes M.C. <sup>4</sup> , Morales-Hernández J. <sup>5</sup> , Sandoval-González A. <sup>2*</sup>	

---

## Avances en el desarrollo en recubrimientos autorreparable

### Advances in the development of self-healings coatings

Domínguez-De Los Santos F.J.<sup>1</sup>, Gómez-Álvarez F.J.<sup>1</sup>, Rojas-Blanco L.<sup>1</sup>, Escalante-Pérez M.E.<sup>1</sup>  
Ramírez-Morales E.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Avenida Universidad s/n Zona de la Cultura, Colonia  
Magisterial CP 86690 Villahermosa Centro Tabasco México  
\*eriking10@hotmail.com

**Artículo Científico**  
**Publicado: 30 de abril 2026**

---

#### RESUMEN

El propósito de este estudio es ofrecer un análisis detallado sobre el impacto y el potencial de los recubrimientos autorreparables en la ingeniería de materiales. Estas soluciones representan un avance significativo en la ciencia de materiales, ya que poseen la capacidad de recuperar su funcionalidad tras sufrir daños superficiales, como arañazos o fisuras. Según el mecanismo de autorreparación, se clasifican en sistemas basados en microcápsulas con agentes reparadores, polímeros curables mediante radiación ultravioleta y redes dinámicas con enlaces reversibles. Estos recubrimientos pueden estar compuestos por polímeros, metales o materiales híbridos, cada uno adaptado a requerimientos específicos en diferentes sectores industriales. Sus aplicaciones abarcan áreas estratégicas como la industria automotriz, la construcción, la electrónica y la biomedicina. Entre sus principales beneficios se destacan la mejora en la durabilidad de los materiales y la reducción de costos a largo plazo, aunque enfrentan limitaciones técnicas como su elevado costo inicial y la funcionalidad restringida en condiciones extremas. A futuro, las investigaciones se centran en desarrollar recubrimientos más económicos y sostenibles, optimizando los procesos de producción y explorando su integración en campos emergentes como la energía renovable y las aplicaciones médicas, consolidando así su importancia en la ingeniería de materiales.

**Palabras clave:** Recubrimientos autorreparables. Corrosión, Innovación, Mecanismos.

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to provide a detailed analysis of the impact and potential of self-healing coatings in materials engineering. These solutions represent a significant advancement in materials science, as they possess the inherent ability to restore functionality after experiencing surface damage, such as scratches or cracks. Based on the self-healing mechanism, they can be classified into systems utilizing microcapsules with repair agents, UV-curable polymers, and dynamic networks with reversible bonds. These coatings may be composed of polymers, metals, or hybrid materials, each tailored to meet specific requirements across various industrial sectors. Their applications span strategic areas such as the automotive industry, construction, electronics, and

biomedicine. Among their main advantages are improved material durability and long-term cost reduction, although they face technical limitations such as high initial costs and restricted functionality under extreme conditions. Future research focuses on developing more cost-effective and sustainable coatings, optimizing production processes, and exploring their integration into emerging fields such as renewable energy and medical applications, thereby solidifying their relevance in materials engineering.

**Keywords:** Self-repairing Coatings, Corrosion, Innovation, Mechanisms.

## INTRODUCCION

En la última década, los recubrimientos autorreparables han surgido como una solución revolucionaria para optimizar la durabilidad y funcionalidad de los materiales empleados en diversos sectores industriales. Se denomina recubrimientos autorreparables a aquellos recubrimientos que poseen la capacidad intrínseca de restaurar su integridad estructural o funcional tras experimentar daños superficiales, como arañazos, grietas o abrasiones, sin requerir una intervención manual significativa [1]. Esta característica distintiva contribuye no solo a prolongar la vida útil de los materiales, sino también a disminuir los costos asociados al mantenimiento y mitigar el impacto ambiental derivado del reemplazo frecuente de componentes [2].

Las aplicaciones de esta tecnología son amplias y abarcan industrias fundamentales. En el sector automotriz [3], los recubrimientos autorreparables se utilizan para proteger superficies expuestas y componentes mecánicos; en la construcción, para extender la durabilidad de estructuras metálicas y de hormigón; y en la electrónica, para preservar la integridad de los dispositivos frente al desgaste mecánico o químico. Además, su potencial ha comenzado a explorarse en campos emergentes, como la biomedicina, donde podrían emplearse en recubrimientos funcionales para implantes y prótesis.

Este artículo tiene como propósito principal ofrecer una revisión exhaustiva sobre los recubrimientos autorreparables, destacando los avances tecnológicos recientes, los mecanismos que sustentan su funcionamiento y las aplicaciones más relevantes. Asimismo, se abordan las ventajas y limitaciones actuales de estos materiales, junto con los retos técnicos que enfrentan, con el objetivo de proporcionar una visión integral de su impacto y su potencial de aplicación en la ingeniería de materiales.

## CLASIFICACIÓN

La clasificación de los recubrimientos autorreparables se puede hacer en función del mecanismo que permite la autorreparación del recubrimiento.

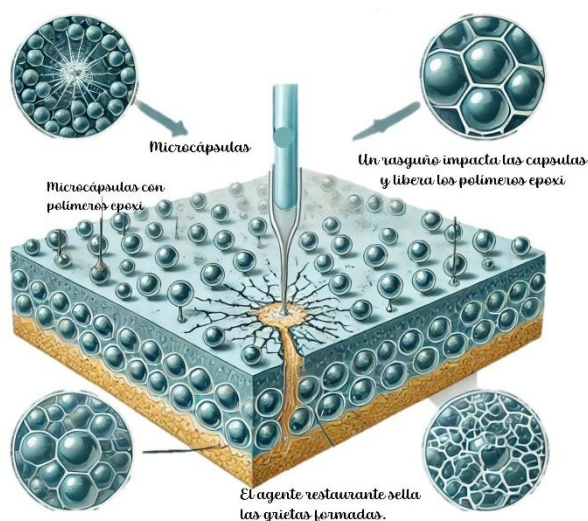
Los mecanismos de autorreparación son una combinación de pasos constitutivos que empieza desde que se genera el daño en la matriz del recubrimiento, para dar paso a los agentes reparadores, el curado, la activación o la generación dependiendo cual sea el caso.

En el siguiente apartado se consideran los mecanismos de auto reparación encontrados en la literatura.

**Basados en cápsulas o microcontenedores.** Este enfoque utiliza microcápsulas o microcontenedores dispersos en la matriz del recubrimiento, los cuales contienen agentes reparadores, como monómeros, polímeros líquidos o reactivos químicos. Ante un daño, como un arañazo o una grieta, las cápsulas se rompen mecánicamente, liberando su contenido en el sitio afectado. Los agentes liberados interactúan con el entorno o con otros componentes del recubrimiento, provocando una reacción química que sella el daño [4].

### Ejemplos destacados:

**Polímeros epoxi encapsulados.** Son un ejemplo de ello los polímeros epoxi encapsulados utilizados en los recubrimientos anticorrosivos auto reparables. Los cuales se basan en agentes epoxi, que son compuestos en estado líquido o prepolimerizado, que se encuentran microencapsulados o microcontenidos en cápsulas de tamaño nano dispersadas dentro de la matriz de los recubrimientos, **Figura 1**. Estos contenedores funcionan como almacén del agente reparador y actúan ante un daño o golpe, los contenedores se abren y liberan el agente para reparar el recubrimiento [5].



**Figura 1.** Recubrimientos autorreparables basado en microcápsulas.

**Mecanismos de reparación.** El mecanismo de reparación de los polímeros epoxi microcontenidos involucra varios pasos, el primero es la *generación del daño* este empieza en el momento en el que el recubrimiento sufre un daño se propician fuerzas mecánicas que agrietan los microcontenedores y se rompen por lo que los agentes reparadores fluyen hacia la zona con daño a lo que se le conoce como *liberación del polímero epoxi*. Por lo general, en los recubrimientos autorreparables el polímero epoxi microcontenido se mezcla con un *agente de curado* liberado de manera simultánea. El recubrimiento se recupera gradualmente sus propiedades [6].

**Microcápsulas con polímeros curables por UV.** Este mecanismo utiliza microcontenedores que contienen polímeros prepolimerizados o líquidos (autorreparables) sensibles a la luz ultravioleta. Como la mayoría de los recubrimientos de microcontenedores las cápsulas están dispersas

alrededor del recubrimiento y al romperse, sueltan su contenido en el área dañada. La regeneración se completa al someter el área dañada a la radiación con luz ultravioleta, activando de manera inmediata el proceso de curado del polímero [7].

Aunque este mecanismo es eficiente, su capacidad de autorreparación puede ser limitada, ya que depende de la cantidad de microcápsulas incorporadas en el recubrimiento. Una vez agotadas, el material pierde esta funcionalidad.

**Mecanismo de reparación.** El proceso de autorreparación de los recubrimientos con microcontenedores UV, consta de un proceso de 5 pasos, la generación del daño, liberación del polímero curable, activación por luz UV y la restauración del recubrimiento. La generación del daño comienza con una grieta o fractura mecánica rompe los microcontenedores contenidos en el recubrimiento, lo que da paso a la liberación del polímero curable, el líquido contenido se derrama y fluye hacia el área dañada y rellena el espacio, después sigue la activación por luz ultravioleta, al exponer el recubrimiento se inicia la polimerización, restauración del recubrimiento, el polímero solidificado restaura la integridad del recubrimiento, **Figura 2** [8], [9].



**Figura 2.** Recubrimientos autorreparables basados en microcapsulas curables po UV.

**Basados en redes dinámicas o reversibles.** Los recubrimientos que están basados en redes dinámicas o reversibles utilizan materiales que incorporan enlaces químicos que puedan formarse o romperse de manera inspeccionada bajo ciertas condiciones. Este mecanismo permite que los componentes moleculares del recubrimiento se reorganicen para reparar daños estructurales o funcionales, dando una solución dinámica y autónoma a los daños [10].

**Mecanismo de reparación.** El mecanismo de autorreparación de este recubrimiento está basado en la capacidad que tienen sus enlaces para restablecerse de manera dinámica, **Figura 3**. Este mecanismo está formado por 4 pasos, formación de enlaces, daño, reorganización molecular, restauración de la integridad. En la *formación de enlaces*, el recubrimiento está íntegro, los enlaces químicos mantienen su estructura cohesionada. El daño se puede dar por una grieta o fractura que

interrumpe los enlaces en esa área en específico. Se somete a ciertas condiciones como temperatura, luz, pH, etc. Los enlaces pueden reestablecerse y pueden migrar para llenar los defectos o daños, haciendo una *reorganización molecular*. El material se recupera totalmente, restaurando su integridad [11], [12].



**Figura 3.** Recubrimientos autorreparables basados en redes dinámicas.

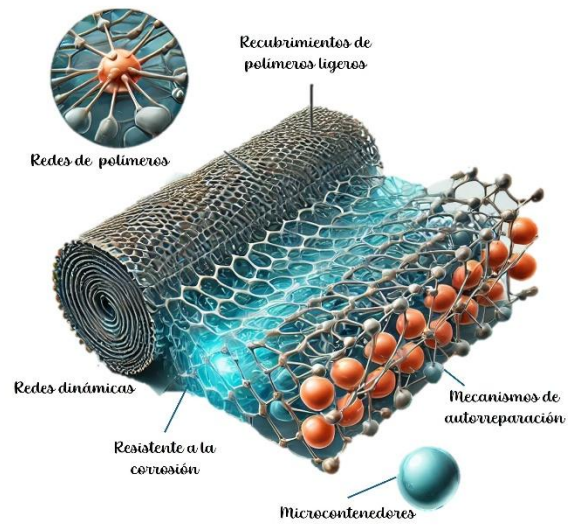
## SEGÚN EL MATERIAL

La selección del material base en los recubrimientos autorreparables es un factor crítico, ya que influye directamente en el comportamiento mecánico, químico y funcional del recubrimiento, así como en su capacidad para responder a estímulos externos. Entre los materiales comúnmente utilizados se destacan los polímeros, los metales y los híbridos, cada uno con aplicaciones específicas y propiedades particulares.

**Polímeros.** Los polímeros son los materiales más ampliamente empleados en recubrimientos autorreparables debido a su facilidad de procesamiento, bajo costo y capacidad para incorporar mecanismos avanzados de reparación, **Figura 4**.

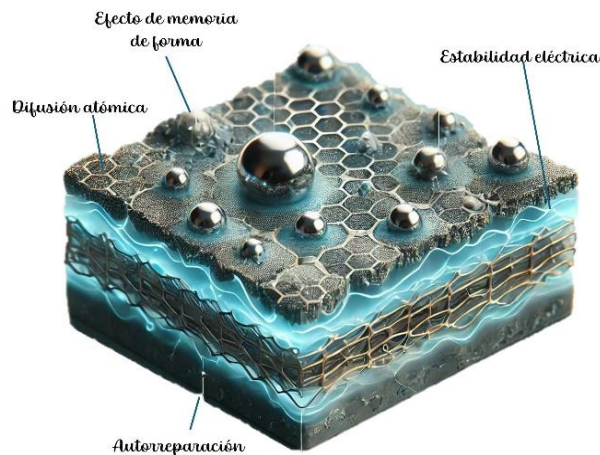
Su versatilidad permite su ajuste químico para adaptarse a diferentes aplicaciones. Este material destaca por su ligereza, flexibilidad y resistencia intrínseca a la corrosión. Estas propiedades los hacen ideales para aplicaciones donde se requieren materiales protectores y funcionales. Los polímeros pueden integrar diversas estrategias autorreparables, tales como las anteriormente mencionadas; redes dinámicas, microcontenedores, etc. [13], [14].

**Metales.** Aunque menos comunes que los polímeros, los metales autorreparables representan una categoría emergente con aplicaciones específicas en infraestructuras críticas y tecnología avanzada. Los metales se caracterizan por su elevada resistencia mecánica, conductividad térmica y eléctrica, y estabilidad en condiciones extremas [15].



**Figura 4** Recubrimientos autorreparables con polímeros.

La reparación en metales suele basarse en procesos de autoensamblaje molecular o en mecanismos físicos y químicos; como la difusión atómica que es característica de materiales con memoria de forma, que a temperaturas elevadas pueden rellenar microgrietas, **Figura 5**. También las microcápsulas, los recubrimientos metálicos que incluyen cápsulas con inhibidores de corrosión o materiales reparadores. La más común, reacciones electroquímicas, este es el proceso en el que se regeneran las películas pasivas, como óxidos protectores en superficies metálicas, como el óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) [13], [16], [17].



**Figura 5.** Recubrimientos autorreparables metálicos.

**Híbridos.** Los materiales híbridos combinan características de polímeros, metales y otros compuestos, como cerámicas o nanopartículas, para ofrecer soluciones innovadoras en recubrimientos autorreparables de alta eficiencia. La combinación de componentes en los materiales híbridos permite mejorar propiedades mecánicas, químicas y térmicas, al tiempo que se optimiza su capacidad de autorreparación. Al igual que las otras clasificaciones los materiales híbridos tienen mecanismos que suelen basarse en sistemas dinámicos y micro contenedores, sin embargo, incorporan nanomateriales como partículas metálicas o cerámicas, que aportan multifuncionalidad y respuesta a estímulos como el calor [18], [19].

## MECANISMOS DE FUNCIONAMIENTO

Entre los principales mecanismos de funcionamiento encontramos aquellos que liberan agentes reparadores, las reacciones químicas inducidas por estímulos, autoorganización molecular. Estos recubrimientos, están diseñados para reaccionar de manera autónoma ante estímulos externos mismos que tienen aplicaciones significativas, la capacidad para regenerar propiedades funcionales perdidas, como la resistencia a fisuras o la impermeabilidad, haciéndolo una solución sostenible frente a los desafíos actuales de durabilidad y mantenimiento [20].

**Liberación de agentes reparadores.** Este mecanismo se basa en la inclusión de cápsulas o microcontenedores en la matriz del recubrimiento, los cuales almacenan agentes reparadores. Cuando se genera un daño, como una fisura, estas cápsulas se rompen, liberando su contenido. Los agentes reparadores, generalmente resinas o polímeros reactivos, llenan la fisura y se solidifican, restaurando la continuidad estructural y funcional del recubrimiento [21].

**Reacciones químicas inducidas por estímulos.** En este caso, el recubrimiento contiene compuestos que reaccionan químicamente ante estímulos externos, como cambios de temperatura, humedad o pH. Por ejemplo, el contacto con agua puede activar la formación de productos de reacción, como carbonato de calcio, que rellenan y sellan las fisuras. Este proceso asegura una autorreparación eficiente sin la necesidad de intervención externa [22], [23].

**Autoorganización molecular.** Basado en la capacidad que tienen ciertos materiales para reorganizar sus moléculas después de un daño. A través de interacciones químicas o físicas, como enlaces de hidrógeno o fuerzas de van der Waals, las moléculas migran hacia las áreas dañadas, restaurando la cohesión y las propiedades funcionales del recubrimiento [24].

## ANTECEDENTES

Alave Luque y colaboradores [25] reportaron la Incorporación de óxido de calcio (CaO) como material autorreparable, donde el CaO al reaccionar con agua presente en el entorno forma hidróxidos de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), mismo que se carbonata al reaccionar con dióxido de cloro presente en el aire o agua circundante. Dicho proceso genera depósitos de CaCO<sub>3</sub>, los resultados obtenidos favorecieron las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y flexión del concreto, contribuyendo tanto a la durabilidad como a la capacidad de autorreparación.

El grupo de trabajo de Ángeles Chavesta y colaboradores [26] llevaron a cabo diferentes técnicas para la reducción de los efectos de la corrosión en las cabinas de maquinaria pesada, algunos basados en PVP, mismos que actúan como una barrera para proteger superficies de acero al carbono AISI 1020, especialmente en ambientes salinos agresivos como los de la minería. Se demostró que la implementación de este recubrimiento mejoraba considerablemente la durabilidad frente a factores como humedad, temperatura y presión. Santibáñez Reyes y su grupo de trabajo [27] llevaron a cabo la preparación y caracterización de moléculas autoensambladas en superficies de óxido de indio y estaño, mencionando que este proceso ocurre en las moléculas cuando son expuestas a la superficie, guiadas por fuerzas de van der Waals, enlaces covalentes, interacciones hidrofóbicas y electrostáticas. Ofreciendo cualidades como que las SAMs en ITO para la construcción de estructuras más complejas, como sensores, recubrimientos funcionales, y catalizadores.

El equipo de trabajo de Mariel Arano y colaboradores [28], llevaron a cabo la implementación de compuestos autorreparables epoxi-fibra de carbono, llevando a cabo la modificación de la matriz epóxica modificando los enlaces covalentes dinámicos (vitrímeros), donde el proceso de autoreparación es activado a través del calor, alterando la topología del polímero para así restaurar sus propiedades estructurales. Proporcionando resistencia mecánica, mientras que la matriz víttrica gestiona las microfisuras.

El trabajo llevado a cabo por Burgos Campuzano y colaboradores [29] hizo uso de fibras orgánicas e inorgánicas en hormigones, donde su aportación integró la reparación de manera autógena y autónoma, sirviendo como agente curativo interno, para el sellado de grietas, con ello se vio mejora en las propiedades mecánicas del hormigón. El grupo de trabajo de Federico Guerrero Ruiz y colaboradores [30], realizó el estudio de recubrimiento polimérico autorreparable basado en poliuretano y magnetita. El mecanismo externo del recubrimiento incorpora nanopartículas de magnetita para facilitar la autorreparación mediante estímulos como luz ultravioleta (UV) o calor. Con ello se ven mejoradas las propiedades hidrofílicas como alta tensión y dureza.

## APLICACIONES DENTRO DEL CAMPO INDUSTRIAL

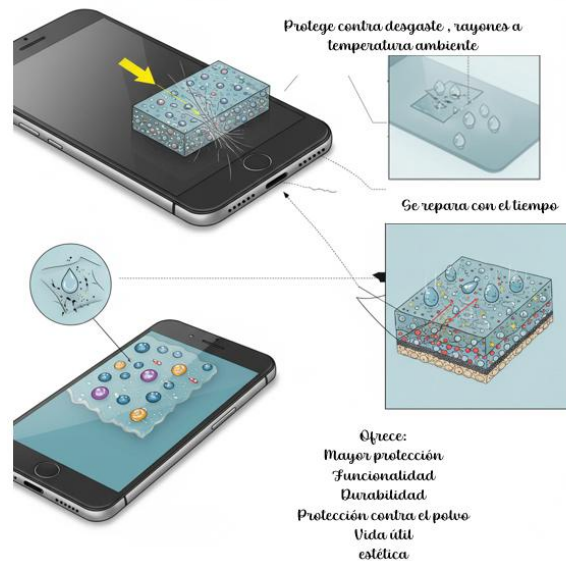
**Recubrimientos automotrices.** En el área industrial automotriz se suelen encontrar recubrimientos diseñados con polímeros con memoria, cuya intención es reparar pequeños rasguños mediante la exposición a la luz ultravioleta (UV); recubrimientos epoxi con microcápsulas de agentes inhibidores que se suelen liberar al dañarse, **Figura 6.**

Mismos que han brindado grandes beneficios como es el acabado estético y la preservación de la vida útil del recubrimiento. Protegen zonas ocultas o difíciles de inspeccionar, como cavidades internas del chasis [31].



**Figura 6.** Recubrimientos autoreparables en el área automotriz.

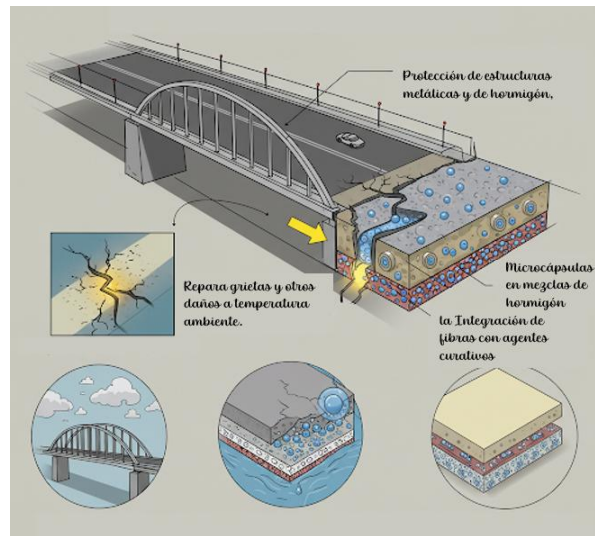
**Tecnología.** En este sector, los recubrimientos autorreparables tienen aplicaciones destacadas, como se aprecia en la **Figura 7**, basados en polímeros o hidrofóbicas y autorreparables, que protegen contra desgaste pequeños arañazos a temperatura ambiente, huellas dactilares y rayones. Reduciendo así la necesidad de protectores de pantalla adicionales, mejorando la estética y funcionalidad y la durabilidad de la carcasa sin comprometer su diseño estético [32], [33].



**Figura 7.** Recubrimientos autoreparables presents en la tecnología.

**Infraestructura y Construcción.** En esta área, los recubrimientos autorreparables se aplican para proteger estructuras metálicas y de hormigón, destacándose los siguientes: los recubrimientos epoxi con inhibidores de corrosión, como se observa en la **Figura 8**, la Integración de fibras con agentes curativos o microcápsulas en mezclas de hormigón, recubrimientos resistentes al desgaste, mismos que suelen otorgar grandes beneficios como evitar se propague el fenómeno de la corrosión

en ambientes agresivos (marítimos o industriales), incremento en la durabilidad de infraestructuras críticas, reducción significativa en costos de mantenimiento, aplicaciones en puentes de acero, plataformas petroleras, túneles, presas, edificaciones de gran altura y naves industriales [34], [35] .



**Figura 8.** Recubrimientos autoreparables presente en estructuras metálicas y hormigón.

## VENTAJAS Y LIMITACIONES

Uno de los métodos que ha generado un gran impacto en diversas industrias son los recubrimientos, debido a sus múltiples cualidades y su efectividad frente al incremento de estructuras metálicas expuestas a medios agresivos, daños ambientales y otros factores adversos.

Esta situación ha generado la necesidad de analizar y comparar las competencias que los recubrimientos autorreparables, pueden ofrecer frente a otros tipos de recubrimientos convencionales [32]. En la **Tabla 1** se presentan algunas de las cualidades más comunes que distinguen a los recubrimientos autorreparables en comparación con otros tipos de recubrimientos. Asimismo, se detallan las ventajas y desventajas que estos recubrimientos pueden ofrecer como alternativa para mitigar los efectos de la corrosión y mejorar la durabilidad de las estructuras expuestas a entornos agresivos [36], [37], [38], [39] .

### Ventajas de los recubrimientos autorreparables

- Extensión de la vida útil
- Reducción de costos a largo plazo
- Menor impacto ambiental
- Innovación funcional

## Limitaciones de los recubrimientos autorreparables

- Costo inicial elevado
- Limitaciones en condiciones extremas
- Capacidad de reparación limitada
- Pérdida de propiedades con el tiempo
- Complejidad técnica

**Tabla 1.** Recubrimientos autos reparables Vs otros recubrimientos, Fuente propia.

Aspecto	Autorreparables	Cerámicos	Metálicos
Resistencia a daños	Repara microfisuras automáticamente.	Alta dureza, pero frágiles ante impactos.	Muy resistentes, pero susceptibles a corrosión.
Durabilidad	Depende de la regeneración química o física.	Alta resistencia a altas temperaturas y desgaste.	Duración limitada sin recubrimientos adicionales.
Costos iniciales	Más altos debido a materiales avanzados.	Bajos costos.	Altos costos de acuerdo con el tipo de aleación
Adaptabilidad	Personalizables para condiciones específicas.	Limitados por la fragilidad o rigidez.	Ambientes industriales.

## DESAFÍOS Y PERSPECTIVAS FUTURAS

A pesar de los avances logrados en el desarrollo de recubrimientos autorreparables, su adopción generalizada enfrenta múltiples desafíos técnicos, económicos y ambientales.

Superar estas limitaciones permitirá ampliar sus aplicaciones y optimizar su funcionalidad, posicionándolos como una solución clave en diversas industrias [15].

**Desarrollo de materiales más económicos y sostenibles.** Uno de los principales retos para la implementación masiva de los recubrimientos autorreparables radica en los altos costos de producción, derivados de la complejidad de los materiales y procesos implicados. Además, existe una creciente demanda por tecnologías que sean ambientalmente responsables.

**Estrategias para reducir costos.** La incorporación de polímeros provenientes de fuentes renovables o materiales reciclables podría disminuir la dependencia de compuestos derivados del petróleo. La optimización de los procesos de síntesis, como la fabricación de microcápsulas o redes dinámicas, permitiría simplificar su producción y reducir los costos asociados. Incrementar la escala de producción contribuiría a una reducción significativa en el costo unitario, facilitando su adopción en aplicaciones de alto volumen, entre otras [40].

**Ampliación de aplicaciones industriales.** Aunque los recubrimientos autorreparables ya han demostrado su utilidad en sectores como la automoción, la electrónica y la aeronáutica, su integración en otras áreas industriales aún es limitada. Sin embargo, su potencial es significativo en aplicaciones emergentes.

Hay oportunidades de expansión como el sector de energías renovables, estos materiales podrían proteger turbinas eólicas, paneles solares y baterías frente a daños mecánicos o ambientales. La agricultura, los recubrimientos autorreparables podrían extender la vida útil de maquinaria y estructuras sometidas a condiciones adversas. En el ámbito médico, la utilización de recubrimientos autorreparables en dispositivos implantables reduciría la necesidad de reemplazos frecuentes, mejorando los resultados clínicos y reduciendo costos [41].

## CONCLUSIONES

Los recubrimientos autorreparables constituyen un avance trascendental en el ámbito de los materiales funcionales, destacándose por su capacidad para restaurar daños de forma autónoma, lo que prolonga la vida útil de los sistemas, reduce los costos asociados al mantenimiento y disminuye su impacto ambiental. Estas características los convierten en una tecnología de gran relevancia para sectores estratégicos como la industria automotriz, la electrónica, la infraestructura y las energías renovables.

A pesar de los importantes avances persisten retos significativos. Entre ellos destacan la necesidad de reducir los costos de producción, incrementar la sostenibilidad de los materiales empleados y garantizar su desempeño confiable en condiciones operativas complejas. En este contexto, resulta imprescindible seguir investigando nuevas estrategias que permitan superar estas limitaciones, tales como el desarrollo de materiales más económicos y ecológicamente responsables, así como la integración de tecnologías avanzadas, como la sensorización y la conectividad inteligente.

La investigación en recubrimientos autorreparables debe adoptar un enfoque interdisciplinario que abarque áreas como la química de polímeros, la nanotecnología y la ciencia de datos, con el objetivo de optimizar su funcionalidad y ampliar su rango de aplicaciones. Este esfuerzo no solo permitirá superar las barreras actuales, sino que también abrirá nuevas oportunidades para el diseño de recubrimientos multifuncionales capaces de responder a las crecientes demandas de sostenibilidad, eficiencia y rendimiento en la industria.

Por tanto, la continuidad de la investigación y el desarrollo en este campo es esencial para consolidar los recubrimientos autorreparables como una herramienta clave en la transición hacia sistemas materiales más resilientes y sostenibles. Los avances futuros en esta tecnología tienen el potencial de transformar la manera en que abordamos la durabilidad y el mantenimiento, aportando soluciones innovadoras a los desafíos técnicos y ambientales de un mundo en constante evolución.

## REFERENCIAS

- [1] I. Anda-Domínguez *et al.*, “Desarrollo de una matriz polimérica con propiedades autorreparables,” *JÓVENES EN LA CIENCIA*, vol. 28, pp. 1–9, 2024.
- [2] F. A. Domínguez-Saldaña *et al.*, “Obtaining semi-flexible polyurethane composites with shape memory,” *JÓVENES EN LA CIENCIA*, vol. 21, pp. 1–14, 2023.
- [3] C. Lorente, R. del Olmo, H. Mora-Sánchez, E. Matykina, and R. Arrabal, “MÉTODOS DE PROTECCIÓN FRENTE A LA CORROSIÓN LIBRES DE Cr (VI) PARA ALEACIONES DE

ALUMINIO EN LA INDUSTRIA AERONÁUTICA,” *REVISTA DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE MATERIALES*, p. 32, 2020.

- [4] J. Rodríguez-Manrique, A. Chávez-Salazar, and F. Castellanos-Galeano, “Análisis de patentes relacionadas a la microencapsulación con recubrimientos de Ñame (*Dioscorea Rotundata*) mediante secado por aspersión,” *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, vol. 11, no. 3, pp. 579–590, 2021.
- [5] T. Byrne Prudente, I. Cuellar, F. I. Altuna, and C. E. Hoppe, “Recubrimientos poliméricos autorreparables basados en vitrímeros epoxi-ácido,” *Investigación Joven*, vol. 10, 2023.
- [6] G. H. De Loera-Chávez *et al.*, “Desarrollo de poliuretano semiflexible base agua tipo multibloque con propiedades autocurativas y protección en ambientes corrosivos,” *JÓVENES EN LA CIENCIA*, vol. 16, pp. 1–16, 2022.
- [7] M. Shahbazi and H. Jäger, “Current status in the utilization of biobased polymers for 3D printing process: a systematic review of the materials, processes, and challenges,” *ACS Appl Bio Mater*, vol. 4, no. 1, pp. 325–369, 2020.
- [8] L. Qi *et al.*, “Preparation and characterization of PFMP@GE microcapsules for enhancing the safety of UV-curable polymers,” *React Funct Polym*, vol. 205, p. 106042, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.REACTFUNCTPOLYM.2024.106042.
- [9] T. Wang, X. B. Liu, J. Luo, G. Sun, and R. Liu, “Interfacial polymerization for preparation of capsaicin microcapsules: Achieving sustained release in UV-curable coatings on plastic substrates,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 696, p. 134379, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.COLSURFA.2024.134379.
- [10] X. Feng *et al.*, “Fabrication and properties of recyclable tung oil-based polymer coatings based on dual cross-linked dynamic covalent polymer networks,” *Prog Org Coat*, vol. 192, p. 108521, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.PORGOAT.2024.108521.
- [11] Y. Li, Y. Jin, R. Zhou, W. Zeng, and J. Mei, “A rapid room-temperature self-healing, antibacterial, photoluminescent waterborne polyurethane coating with excellent mechanical properties based on double dynamic cross-linked network used for leather finishing,” *Prog Org Coat*, vol. 190, p. 108386, May 2024, doi: 10.1016/J.PORGOAT.2024.108386.
- [12] H. Wang, F. Wang, R. Y. Sun, F. Song, and Y. Z. Wang, “Solvent-free epoxy coatings with enhanced cross-linking networks towards highly-efficient flame retardancy, water resistance and anticorrosion,” *Prog Org Coat*, vol. 197, p. 108835, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.PORGOAT.2024.108835.
- [13] A. Kouhpour, P. E. Moghaddam, I. Karpov, E. Behzadfar, and H. Zarrin, “Semi-intrinsic self-healing epoxy coating using ionic liquid and super absorbent polymer,” *Prog Org Coat*, vol. 199, p. 108951, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.PORGOAT.2024.108951.
- [14] M. Kianfar, M. S. Seyed Dorraji, M. H. Rasoulifard, A. Rahimi, and S. Rahmani, “Synthesis and application of Aromatic Schiff base waterborne polyurethane as visible-light triggered self-healing

- polymer and anticorrosion coating using h-BN/GO/NiO nanocomposite,” *Polym Test*, vol. 141, p. 108649, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.POLYMERTESTING.2024.108649.
- [15] P. Wang *et al.*, “MXene/Metal–Organic framework based composite coating with photothermal self-healing performances for antifouling application,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 474, p. 145835, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.CEJ.2023.145835.
- [16] S. Guo, Z. Yu, B. Peng, K. Li, S. Xia, and Y. Chen, “Advanced eco-friendly dual-layer coating: Combining superhydrophobicity with smart self-healing for superior metal protection,” *Prog Org Coat*, vol. 197, p. 108774, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.PORCOAT.2024.108774.
- [17] X. Ma *et al.*, “Toward self-healing two dimensional MXene coatings for corrosion protection on metals: Design strategies and mechanisms,” *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 335, p. 103340, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.CIS.2024.103340.
- [18] R. Navarro, R. S. Rivero, J. M. Cuevas, and Á. M. Fernández, “Recubrimientos de poliuretano autorreparables basados en luz solar para automoción,” *Revista de plásticos modernos: Ciencia y tecnología de polímeros*, vol. 120, no. 762, p. 2, 2020.
- [19] K. Juárez-Moreno, “EN LA ARQUITECTURA: UNA VISIÓN INTEGRAL EN EL USO DE NANOMATERIALES,” *RAZÓN, PENSAMIENTO*, vol. 5, no. 2, 2024.
- [20] X. Ma *et al.*, “Toward self-healing two dimensional MXene coatings for corrosion protection on metals: Design strategies and mechanisms,” *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 335, p. 103340, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103340>.
- [21] R.-U.-D. Nassar, K. Alamara, A. Balachandra, P. Soroushian, and T. Ghebrab, “Performance Evaluation of Innovative Self-healing Corrosion Protection Coatings for Prestressing Strands,” *Heliyon*, p. e40681, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40681>.
- [22] J. Wang, F. Seidi, X. Shi, C. Li, Y. Huang, and H. Xiao, “Unveiling the potential of dual-extrinsic/intrinsic self-healing lignin-based coatings for anticorrosion applications,” *Int J Biol Macromol*, p. 138073, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138073>.
- [23] Y. Dong, P. Liu, R. Li, M. Han, and Y. Shen, “Natural light-induced self-healing antibacterial superhydrophobic coatings based on ODA/Ag-PDA@HMS-ODA,” *Appl Surf Sci*, vol. 684, p. 161803, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.161803>.
- [24] K. Chen *et al.*, “Self-healing polyurethane coatings based on dynamic chemical bond synergy under conditions of photothermal response,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 474, p. 145811, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.145811>.
- [25] E. Alave Luque, “Incorporación de óxido de calcio en las propiedades mecánicas y autorreparables del concreto estructural en Juliaca 2023,” universidad Cesar Vallejo, Peru, 2023. Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/136816>
- [26] G. C. B. V. M. C. Angeles Chavesta, “Nuevas técnicas para reducir los efectos de la corrosión en las cabinas de maquinaria pesada,” 2022. Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/117012>

- [27] CONSTANZA CAROLINA SANTIBÁÑEZ REYES, “PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MOLÉCULAS AUTOENSAMBLADAS EN SUPERFICIES DE ÓXIDO DE INDIO Y ESTAÑO,” Chile, 2022. Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/185983>
- [28] F. Mariel Arano and D. María José Churruca, “Proyecto final para optar al grado de Ingeniero en Materiales Desarrollo de compuestos autorreparables epoxi-fibra de carbono.”
- [29] C. A. Burgos Campuzano, “Estado de la investigación del uso de fibras orgánicas e inorgánicas para el diseño de hormigones autorreparables,” 2024. Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/13797>
- [30] F. Guerrero Ruiz, “POLIURETANOS TERMOESTABLES VITRIMÉRICOS CON PROPIEDADES MEJORADAS DE RECICLABILIDAD.”
- [31] H. Pulikkalparambil, J. Parameswaranpillai, J. Pionteck, D. Nandi, and S. Siengchin, “Autonomous self-healing in green epoxy thermosets for flexible functional coatings,” *Constr Build Mater*, vol. 393, p. 132090, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132090>.
- [32] S. Yan, J. Li, J. Shi, X. Gao, and K. Yu, “Study of  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>@hydroxyapatite/CaCO<sub>3</sub> as an activator to promote the formation of Zr-Si composite coating with self-healing properties on the surface of advanced high strength steels,” *Appl Surf Sci*, vol. 637, p. 157907, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157907>.
- [33] H. Huangfu *et al.*, “A smart composite coating with self-reporting and self-healing functions to enhance corrosion protection for magnesium alloys,” *Prog Org Coat*, vol. 181, p. 107598, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.107598>.
- [34] S. Muñoz *et al.*, “Recubrimientos nanocolumnares estructurados sobre sustratos rugosos y litografiados en condiciones industriales.”
- [35] M. Peñas, “Materiales compuestos con capacidad de autorreparación Self-healing composite materials,” España, 2023. Accessed: Nov. 30, 2024. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.14352/88421>
- [36] S. W. Deng, L. B. Tong, X. J. Li, J. H. Chu, M. M. Li, and D. N. Zou, “Enhanced anti-corrosion/wear properties of Mg alloy through a hierarchical bio-inspired self-healing composite coating,” *Colloids Surf A Physicochem Eng Asp*, vol. 658, p. 130770, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2022.130770>.
- [37] K. Auepattana-Aumrung and D. Crespy, “Self-healing and anticorrosion coatings based on responsive polymers with metal coordination bonds,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 452, p. 139055, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139055>.
- [38] Y. Tang *et al.*, “Effect of deposition sequence of MgAl-LDH and SiO<sub>2</sub>@PDMS layers on the corrosion resistance of robust superhydrophobic/self-healing multifunctional coatings on magnesium alloy,” *Prog Org Coat*, vol. 174, p. 107299, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.107299>.

- [39] X. Xue, C. Liang, D. Wang, and F. Peng, “The research progress of self-healing coatings for magnesium/magnesium alloy,” *J Alloys Compd*, vol. 960, p. 170710, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.170710>.
- [40] S. Jin *et al.*, “Self-healable spray paint coatings based on polyurethanes with thermal stability: Effects of disulfides and diisocyanates,” *Prog Org Coat*, vol. 198, p. 108931, Jan. 2025, doi: [10.1016/J.PORGCOAT.2024.108931](https://doi.org/10.1016/J.PORGCOAT.2024.108931).
- [41] J. Wang, F. Seidi, X. Shi, C. Li, Y. Huang, and H. Xiao, “Unveiling the potential of dual-extrinsic/intrinsic self-healing lignin-based coatings for anticorrosion applications,” *Int J Biol Macromol*, p. 138073, Nov. 2024, doi: [10.1016/J.IJBIOMAC.2024.138073](https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2024.138073).