



**universidad  
de león**

## **TESIS DOCTORAL**

# **Protección superficial del hormigón reciclado mediante la biodeposición de sílice biogénica**

---

*Surface protection of recycled concrete by  
biodeposition of biogenic silica*

**Daniel Merino Maldonado**

**Programa de Doctorado en Ingeniería de Biosistemas**

Tutor: Andrés Juan Valdés

Directores

Dr. Andrés Juan Valdés y Dra. Julia M<sup>a</sup> Morán del Pozo

León, 2024



universidad  
de león

TESIS DOCTORAL

# Protección superficial del hormigón reciclado mediante la biodeposición de sílice biogénica

*Surface protection of recycled concrete by  
biodeposition of biogenic silica*

**DANIEL MERINO MALDONADO**

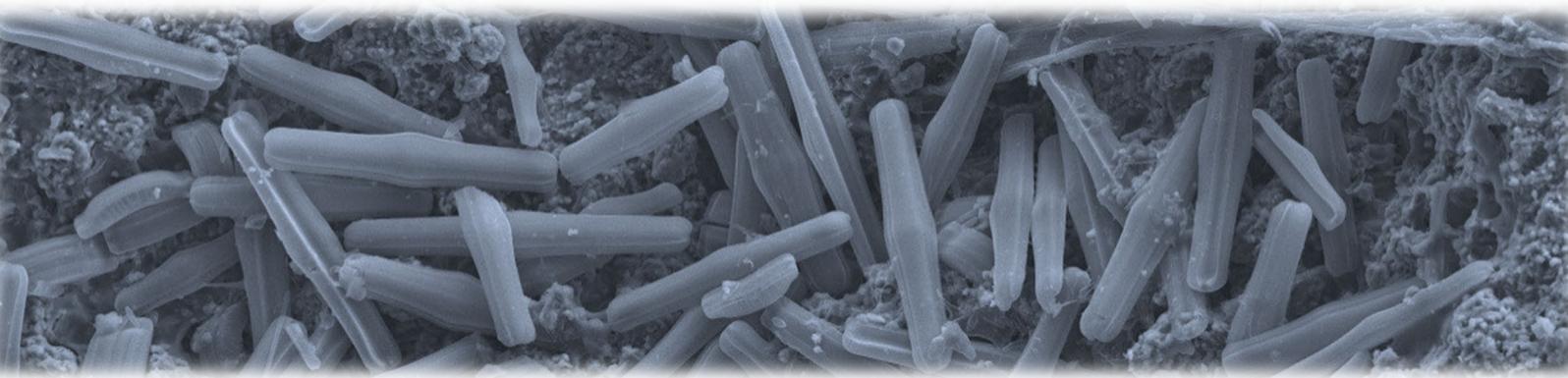
Programa de Doctorado en Ingeniería de Biosistemas

Tutor: Andrés Juan Valdés

Directores:

Dr. Andrés Juan Valdés y Dra. Julia M<sup>a</sup> Morán del Pozo

León, 2024



# Agradecimientos

---

Ahora que me encuentro finalizando esta tesis doctoral, no puedo dejar pasar estas líneas sin tener unas palabras de agradecimiento sincero a todas las personas que me han acompañado en este camino, que, sin ser fácil, su ayuda ha hecho que, al menos, no sea imposible.

Quiero empezar nombrando a los directores de la presente tesis doctoral, los doctores Andrés Juan y Julia M<sup>a</sup> Morán, a quienes reconocer su generosa y altruista ayuda, colaboración y orientación. Un admirable apoyo sin el cual, nada de la presente sería igual.

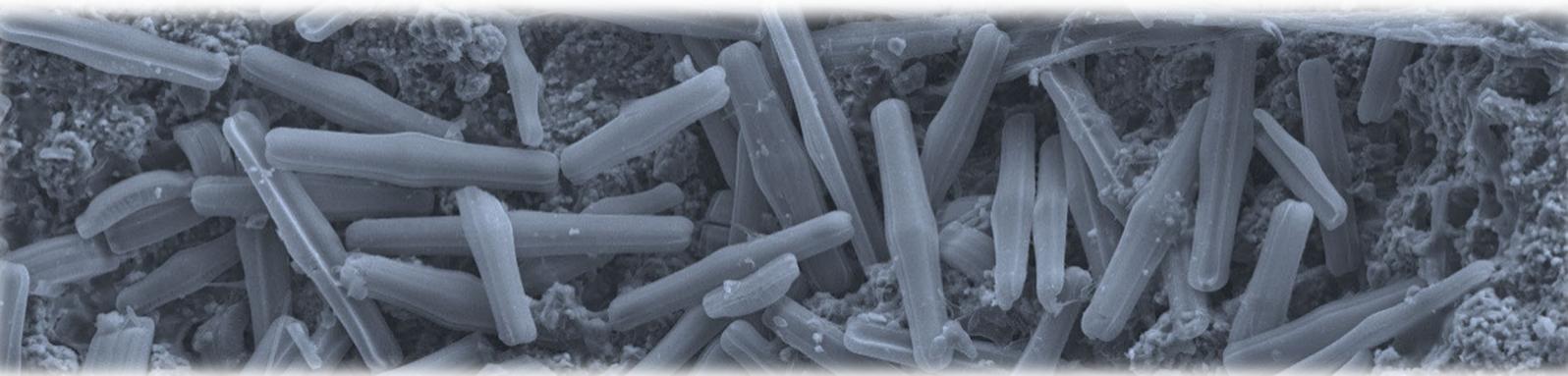
De igual modo, quiero expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que forman parte del grupo de investigación INMATECO, en especial a Julia García, Ignacio Guerra y Andrea Antolín. Gracias por vuestra ayuda a este trabajo. También quiero expresar mi agradecimiento a Saúl Blanco y su equipo, así como a todos los integrantes del grupo de investigación GUIIAS.

Mi reconocimiento en este momento muy especialmente a los doctores María Isabel Sánchez de Rojas y Moisés Frías Rojas, investigadores del Instituto Eduardo Torroja del CSIC y a todas las personas que componen ese equipo. Su ayuda y disposición, han sido indispensables durante mi estancia en este centro y para la realización de esta tesis.

Agradecimientos a la Dra. Paulina Faria y a la Universidad NOVA de Lisboa-FCT, lugar donde realicé una entrañable estancia, y quienes colaboraron tanto como pudieron.

No me quiero olvidar, pues han sido fundamentales en esta etapa, a mi familia, amigos y compañeros. Han sido unos días, meses y años complicados, de una dedicación exclusiva a estos estudios, en ocasiones dedicando más tiempo del debido, robándoles mucho del que a ellos les correspondía. Gracias por vuestra comprensión, apoyo y ayuda, sin ellos, no hubiese podido culminar esta etapa. Los frutos de la misma, serán tanto míos y como vuestros.

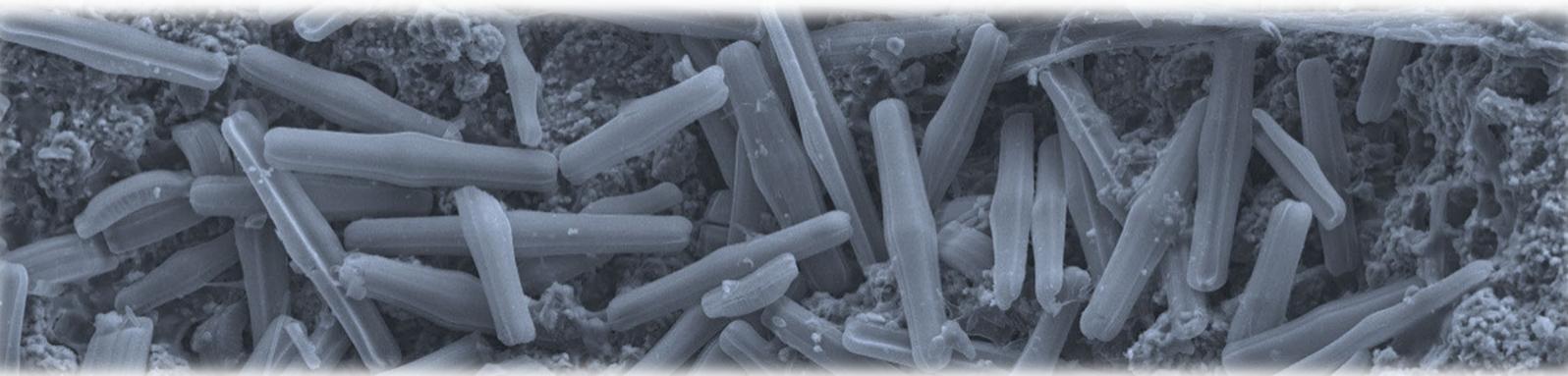
¡Gracias a todos por vuestra generosidad!



# **F**inanciación

---

La presente tesis se ha podido llevar a cabo gracias a la obtención de una beca del programa de Ayudas destinadas a financiar la contratación predoctoral de personal investigador cofinanciadas por el fondo social europeo (Orden EDU/601/2020) de la Junta de Castilla y León por la Orden de 12 de diciembre de 2019.



# Índice

---

Índice .....	1
Índice de Figuras .....	2
Acrónimos .....	3
Resumen .....	6
Abstract.....	7
Introducción.....	10
Generación de Residuos .....	10
Residuos de Construcción y Demolición.....	15
Hormigón con Áridos Reciclados .....	20
Sílice Biogénica.....	23
Biodeposición de Sílice Biogénica.....	27
Objetivos.....	44
Capítulo 1: Innovative approach for the protection of recycled concrete by biogenic silica biodeposition .....	47
Capítulo 2: Improving the performance of recycled concrete by biodeposition of biogenic silica as a surface coating .....	50
Capítulo 3: Surface protection of recycled concrete from different biogenic silica biodeposition techniques: A sustainable approach.....	53
Discusión .....	56
Conclusiones.....	64
Conclusions .....	66

# Índice de Figuras

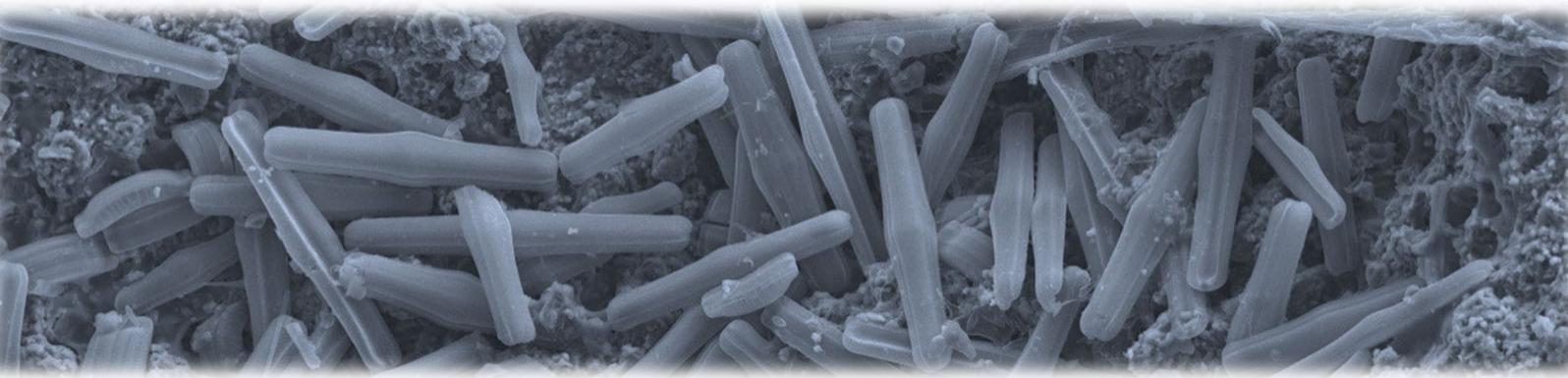
---

Figura 1. Población Mundial proyectada hasta 2100 (Naciones Unidas, 1992).....	10
Figura 2. Generación de residuos por la totalidad de actividades económicas y hogares en la Unión Europea (EU-27), 2004-2020, (EUROSTAT. a, 2024). .....	12
Figura 3. Generación de residuos media por actividad económica y hogares en España en periodo 2004-2020, (EUROSTAT. b, 2024). .....	13
Figura 4. Generación de residuos por la actividad de la construcción en la Unión Europea (UE-27), 2004-2020, (EUROSTAT a, 2024). .....	14
Figura 5. Generación de residuos por la totalidad de actividades económicas y hogares con la comparativa de la generación total de RCD en España, 2004-2020, (EUROSTAT. a, 2024). .....	15
Figura 6. Tasa de recuperación de los RCD en los Estados Miembros de la UE-27 para 2018, (EUROSTAT c, 2024). .....	17
Figura 7. Composición porcentual de los RCD en España, (CEDEX, 2014). .....	19
Figura 8. Estructura y biogénesis de las paredes celulares de las diatomeas. Fuente: (Kröger and Poulsen, 2008). .....	24
Figura 9. Tipos de tratamientos superficiales en hormigón según la norma UNE-EN 1504-2 (AENOR, 2013). .....	29
Figura 10. Método completo de biodeposición en la superficie de hormigones. ....	31

# Acrónimos

---

AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AN	Árido natural
AR	Árido reciclado
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
EDX	Energy Dispersive X-ray spectroscopy
EN	Normativa Europea
EUROSTAT	Oficina Europea de estadística
MITECO	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización Naciones Unidas
RCD	Residuos de Construcción y Demolición
SEM	Scanning Electron Microscope
UE	Unión Europea
UE-27	27 estados miembros de la Unión Europea
UNE	Asociación Española de Normalización





# Resumen

# Resumen

---

La problemática ambiental vinculada a la producción y gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) está experimentando un crecimiento exponencial a nivel global. Por esta razón, la reutilización de estos residuos como áridos reciclados se plantea como una solución para la gestión sostenible de materiales, promoviendo la economía circular en la industria de la construcción. Sin embargo, el hormigón fabricado con este tipo de áridos puede presentar propiedades mecánicas y de durabilidad inferiores al hormigón convencional.

La presente tesis aborda este desafío mediante la investigación de posibles tratamientos superficiales que mejoren las propiedades del hormigón reciclado. En concreto se estudia la viabilidad de la utilización de recubrimientos generados por biodeposiciones de caparazones celulares de diatomeas a través de diversas técnicas.

Este planteamiento implica la acumulación de los propios cuerpos celulares de estas microalgas conforme la colonia va creciendo y adhiriéndose a la superficie del material tratado, con el fin de formar capas de sílice biológica, cuyo efecto de cobertura pueda proporcionar propiedades sellantes y reparadoras en este tipo de materiales base-cemento. Para ello se ha explorado en detalle la biopelícula formada por las microalgas sobre la superficie de los hormigones endurecidos, a fin de obtener unas condiciones idóneas para el crecimiento de las diatomeas, que logren mejorar la eficiencia de la deposición de sílice biogénica para su uso como biomaterial protector.

Una vez que la biopelícula silícea es generada se debe evaluar su impacto en las propiedades mecánicas y durables del hormigón reciclado, comparando las propiedades protectoras que aporta la el biotratamiento con respecto a las muestras no tratadas.

Esta técnica ha demostrado ser altamente efectiva para mejorar la durabilidad y propiedades del hormigón endurecido, con la aspiración de reducir la dependencia de tratamientos superficiales sintéticos en operaciones de reparación o mantenimiento en estructuras de hormigón. De esta manera en la presente tesis se presenta la biodeposición de sílice biogénica como una estrategia sostenible con implicaciones significativas en la construcción, fomentando la economía circular y mejorando las propiedades de los materiales de construcción.

# Abstract

---

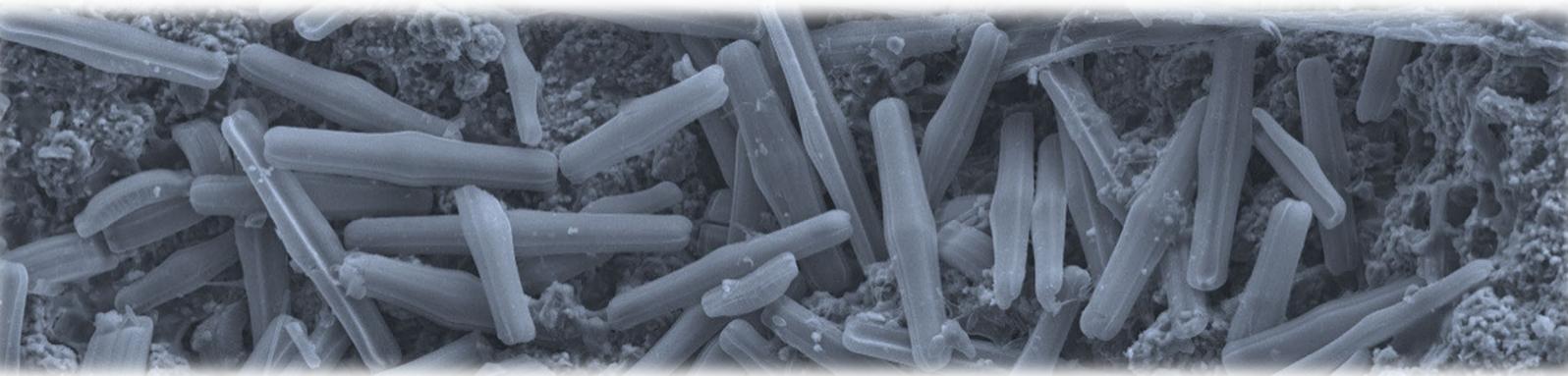
The environmental problems linked to the production and management of construction and demolition waste (CDW) are experiencing exponential increase at a global scale. For this reason, the reuse of these wastes as recycled aggregates is proposed as a solution for the sustainable management of materials, promoting the circular economy in the construction industry. However, concrete made with this type of aggregates can have inferior mechanical and durability properties compared to conventional concrete.

This thesis addresses this challenge by investigating possible surface treatments that improve the properties of recycled concrete. Specifically, the feasibility of using coatings generated by biodeposition of diatom cellular shells through various techniques is studied.

This approach involves the accumulation of the cell bodies of these microalgae as the colony grows and adheres to the surface of the treated material, in order to form layers of biological silica, whose covering effect can provide sealing and repairing properties in this type of cement-based materials. For this purpose, the biofilm formed by the microalgae on the surface of hardened concrete has been explored in detail, in order to obtain ideal conditions for the growth of diatoms, which will improve the efficiency of the deposition of biogenic silica for use as a protective biomaterial.

After the silica biofilm is generated, its impact on the mechanical and durability properties of the recycled concrete must be assessed by comparing the protective properties provided by the biotreatment with those of untreated samples.

This technique has proven to be highly effective in improving the durability and properties of hardened concrete, with the aspiration of reducing the dependence on synthetic surface treatments in repair or maintenance operations on concrete structures. Thus, this thesis presents biogenic silica biodeposition as a sustainable strategy with significant implications in construction, promoting the circular economy and improving the properties of building materials.





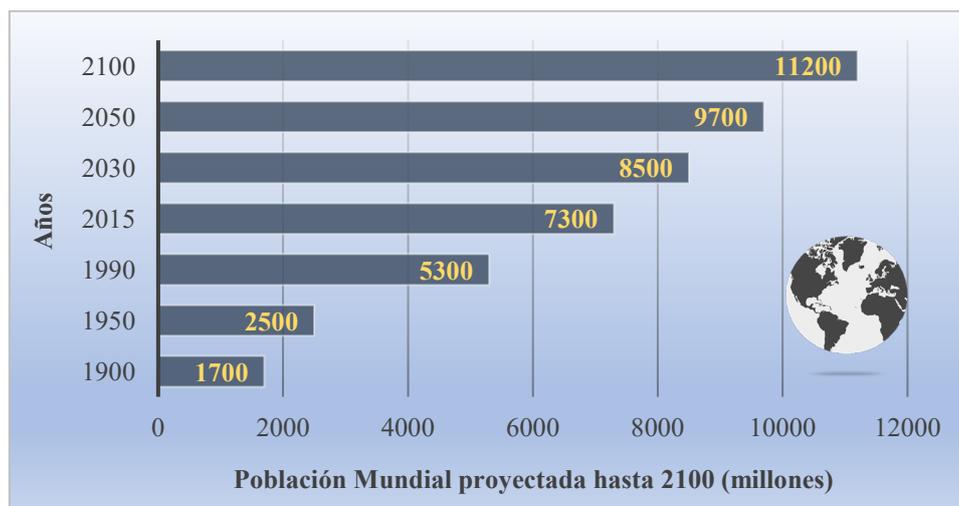
# Introducción

# Introducción

## Generación de Residuos

La construcción es una actividad que está intrínsecamente ligada al crecimiento y desarrollo de las sociedades y por consiguiente está experimentando un notorio crecimiento a nivel global en las últimas décadas, lo que conlleva una importante demanda de consumo de todo tipo de materiales constructivos. Esto es resultado directo del acelerado proceso de industrialización y urbanización, que está siendo potenciado por el desarrollo económico y el crecimiento demográfico de nuestras sociedades.

Desde mediados del siglo XX hasta nuestros días, se está experimentando un crecimiento exponencial en la población mundial. Según datos de la Organización de Naciones Unidas (ONU), se ha pasado de alrededor de los 2.500 millones de personas a mediados de siglo a los 8.000 millones, que presenta actualmente. Esta tendencia al alza no solo refleja la capacidad de la humanidad para adaptarse, sino que se espera que siga incrementándose, anticipándose una cifra estimada de 11.200 millones de personas para el año 2100 (Naciones Unidas, 1992), como se puede observar en la **Figura 1**.



*Figura 1. Población Mundial proyectada hasta 2100 (Naciones Unidas, 1992).*

Este crecimiento demográfico no es un simple dato estadístico, sino que desempeña un papel fundamental como impulsor de la transformación y del desarrollo de todos los sectores, siendo el ámbito de la construcción uno de los campos más afectados por estos hechos, debido a que es un elemento primordial de la evolución urbana, que sirve para atender este crecimiento poblacional (Gürdür Broo et al., 2021). Por consiguiente, este sector está experimentando un evidente aumento en su demanda, ello supone una significativa carga ambiental que afecta a todos los ecosistemas, no únicamente por el consumo masivo de recursos naturales, sino también por la generación de residuos de construcción y demolición (RCDs) por parte de la industria de la construcción. Agudizándose este incremento de RCDs por la obsolescencia de las edificaciones e infraestructuras. Por ello, es importante plantear desafíos considerables en términos de gestión y tratamiento de residuos.

Considerando específicamente el mundo desarrollado o también conocido como el primer mundo, éste se suele caracterizar por una elevada capacidad de consumo basado en los antiguos modelos económicos lineales que han contribuido a la generación y acumulación de importantes cantidades de residuos con bajas tasas de reciclaje (Nadzdi et al., 2022), lo que ha conseguido que se produzca una importante pérdida de recursos, tanto en forma material como en forma de energía, en la producción de nuevos materiales. En este contexto, es fundamental comprender el concepto de residuo, definido como “*cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención u obligación de desechar*”, según la Directiva 2008/98/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008).

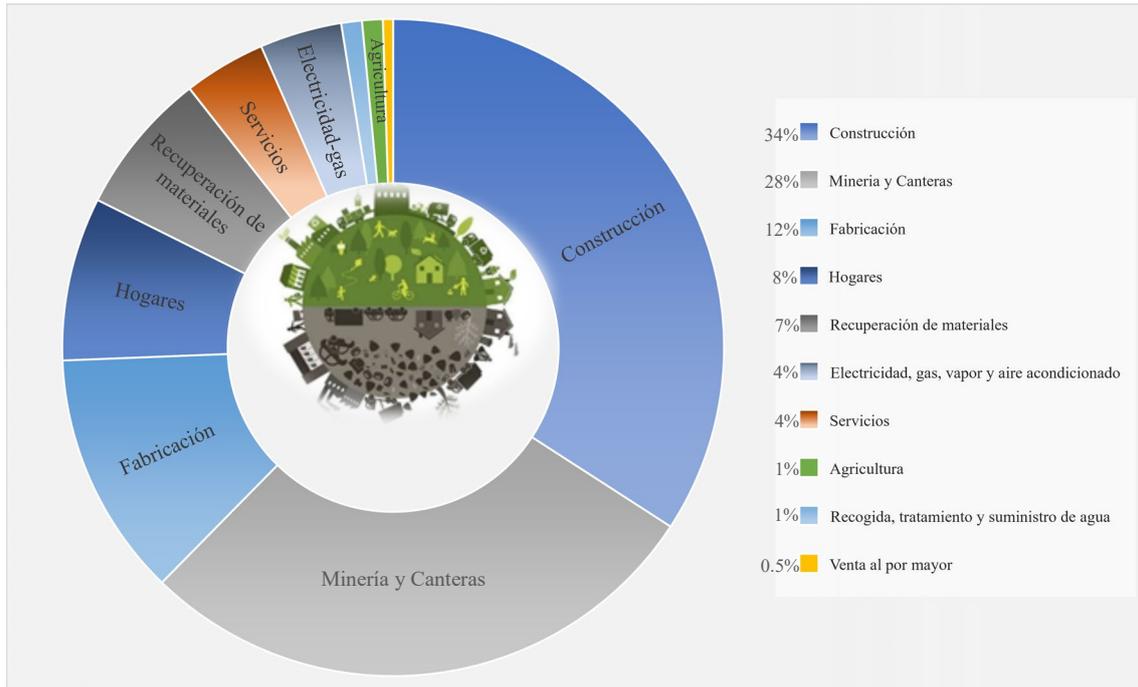
Según los datos de la Oficina Europea de Estadística (EUROSTAT), se revela que el total de residuos generados en la Unión Europea (UE-27 desde 2020) por todas las actividades económicas y hogares superó los 2.338 millones de toneladas en el año 2018 (EUROSTAT. a 2024), sin tener en cuenta la disminución del 2020 debido a la posible paralización de la actividad económica por la pandemia del COVID-19, como se muestra en la **Figura 2**. No obstante, excluyendo este último año, se observa una tendencia al incremento de la producción de residuos totales, alrededor de un 9% respecto a los últimos 10 años hasta el 2018.



*Figura 2. Generación de residuos por la totalidad de actividades económicas y hogares en la Unión Europea (EU-27), 2004-2020, (EUROSTAT. a, 2024).*

Dada la problemática de la generación de estas enormes cantidades de residuos, su correcta gestión ha adquirido un papel muy importante en la agenda de la Unión Europea en busca de la sostenibilidad ambiental (Plaza et al., 2021). Por esta razón, es importante tener en cuenta los porcentajes de generación de residuos según el tipo de actividad económica, quedando patente que algunos sectores desempeñan un papel más significativo que otros y poner el foco en aquellas actividades que más volumen de residuos generan.

En la **Figura 3**, se muestra la media de los porcentajes la generación de residuos por actividad económica y hogares de la Unión Europea, comprendidos entre los periodos 2004-2020 (EUROSTAT. b 2024), donde se puede observar como la construcción emerge como el sector preeminente, con un 34% del total. Este dato refleja la magnitud de la contribución del sector de la construcción a esta problemática. Por ello, es imperativo abordar este desafío, considerando que la construcción no solo es un componente crucial de la evolución urbana, sino también un protagonista destacado en la generación de residuos.



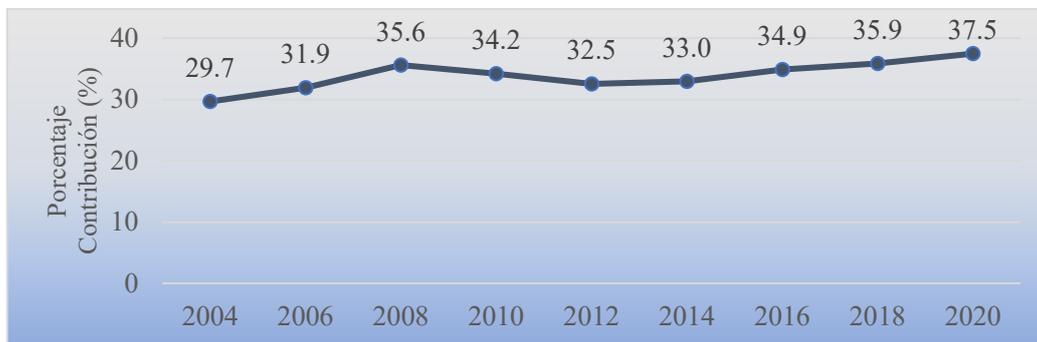
*Figura 3. Generación de residuos media por actividad económica y hogares en España en periodo 2004-2020, (EUROSTAT. b, 2024).*

Dentro de los demás sectores analizados, la minería y canteras también destacan por su alto porcentaje de contribución en la generación de residuos, situándose en un valor medio del 28% en este mismo periodo. Aunque es importante destacar que esta actividad de extracción está teniendo una tendencia a la baja, reduciendo su contribución en el aumento de generación de residuos.

Por otro lado, el resto de sectores como la agricultura, silvicultura y pesca, fabricación, recuperación de materiales, electricidad, gas, vapor y aires acondicionados, servicios, recogida, tratamiento y suministro de agua, hogares y venta al por mayor presentan porcentajes relativamente bajos, entre el 12 y 0,5 % respectivamente. Sin embargo, no se deben pasar por alto, y es crucial implementar prácticas sostenibles incluso en estos ámbitos para garantizar una gestión responsable de los residuos y poder contribuir a la reducción de estos porcentajes.

Estos datos refuerzan la idea de que hay que prestar especial atención al sector de la construcción, ya que en los últimos años esta actividad está presentando un incremento sustancial alcanzando en la Unión Europea valores de hasta los 839 millones de toneladas

en 2018 (EUROSTAT a, 2024) y llegando hasta el 37,5% del total de la producción de residuos en 2020, como se muestra en la **Figura 4**.



*Figura 4. Generación de residuos por la actividad de la construcción en la Unión Europea (UE-27), 2004-2020, (EUROSTAT a, 2024).*

En España el panorama de la generación de residuos refleja similitudes con el conjunto de la UE. Sin embargo, es importante destacar que, a diferencia de la tendencia en el conjunto de la comunidad europea el volumen de generación de residuos totales en España ha experimentado variaciones notables a lo largo de los años. Desde el primer año con datos disponibles en 2004 hasta 2014, se observó un decrecimiento en la generación total, seguido de un incremento en los años subsiguientes, con la excepción del 2020, que al igual que en el resto del mundo, marcó un parón en las actividades debido a la pandemia de la COVID-19, como se evidencia en la **Figura 4**.

En particular, al centrarnos exclusivamente en la actividad de la construcción, ya que representa el mayor volumen de residuos, se pueden observar patrones similares a los de la UE. La **Figura 5** muestra que, durante los años de auge del sector de la construcción, específicamente en 2006, se generaron cantidades significativas que alcanzaron los 47.3 millones de toneladas, lo que representó el 29,4% del total de residuos generados en ese año. A medida que la crisis económica de 2008 impactó en el país, la producción de residuos en el sector experimentó una disminución, alcanzando su punto más bajo en 2014, para luego volver a incrementarse en los años posteriores.

Es crucial destacar que incluso durante el año 2020, marcado por la ralentización de diversas actividades y la consecuente disminución en la generación de residuos en general, la generación de residuos de construcción y demolición mantuvo su relevancia. De hecho, los RCD representaron el 30,8% de la generación total de residuos. Esta cifra resalta la

importancia de poner un enfoque específico en el sector de la construcción, especialmente en la gestión de los RCD. Volviéndose esta situación esencial para mantener un equilibrio entre el desarrollo económico y la sostenibilidad ambiental, tanto en el contexto europeo como el nacional.

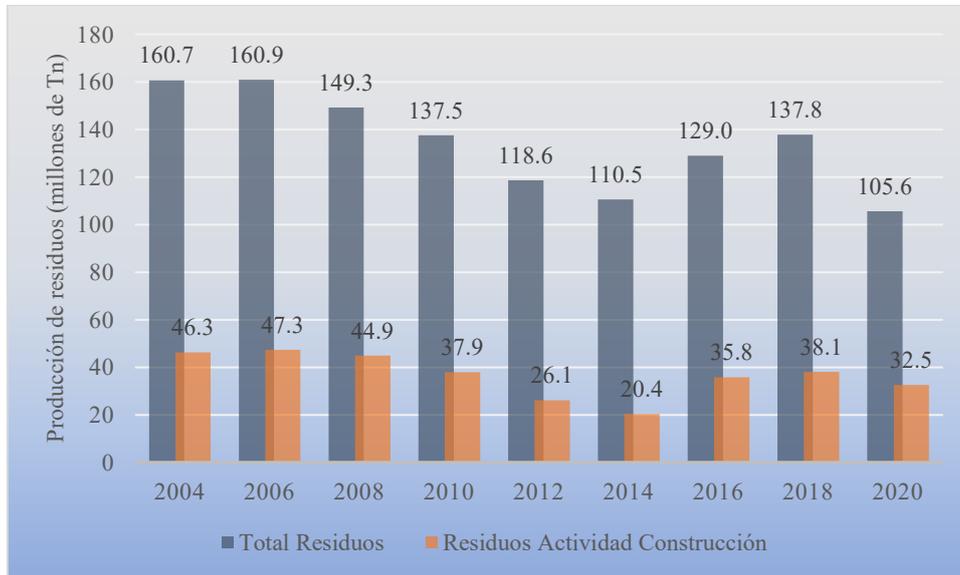


Figura 5. Generación de residuos por la totalidad de actividades económicas y hogares con la comparativa de la generación total de RCD en España, 2004-2020, (EUROSTAT. a, 2024).

## Residuos de Construcción y Demolición

En la actualidad, la atención hacia la gestión de los desechos generados por la actividad humana se ha intensificado de manera significativa. Este fenómeno está estrechamente vinculado a la búsqueda del desarrollo sostenible, el cual se fundamenta en los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) propuestos por la Agenda 2030 (Naciones Unidas, 2023). Esta agenda, adoptada de forma unánime por todos los Estados miembros de las Naciones Unidas, resalta particularmente el objetivo 11, que se enfoca en ciudades y comunidades sostenibles, así como el objetivo 12, orientado hacia la producción y consumo responsables. Sin embargo, es importante destacar que esta preocupación por la gestión sostenible de los desechos tiene sus raíces desde 1987, con el propósito de

transformar la sociedad en una entidad “recicladora” y “sostenible”, según la definición establecida en el informe Brundtland de las Naciones Unidas (Brundtland, 1987).

En este contexto, y dada la relevancia global de la problemática de los residuos, hay que hacer especial hincapié con los RCD, los cuales emergen como una de las principales fuentes de desechos, representando un volumen considerable generado por la renovación de edificaciones (Rodríguez et al., 2015).

Por esta razón, la UE está planteando desde hace años una gestión de residuos que sea eficaz, constituyendo uno de los fundamentos clave de la Estrategia 2020 (Comisión Europea, 2011), titulada “*Una Europa que utilice eficazmente los recursos*”, con la premisa central de lograr que la sociedad europea que sea capaz de optimizar el uso de recursos, apoyándose en los principios de las tres *R*, los cuales son reducir, reciclar y reutilizar.

En respuesta a esta estrategia, los Estados miembros de la Unión Europea han elaborado legislación, en particular desde la aprobación de la Directiva Marco Europea 2008/98/CE sobre los residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008). Esta legislación establece incentivos para la gestión del ciclo de vida de los RCD, con objetivos claros de desvincular el crecimiento económico con el aumento de la generación de residuos y reducir el impacto ambiental asociado.

En el conjunto de la UE se está realizando una buena práctica de gestión de RCD debido a que la tasa de recuperación conformada por 27 países es alrededor del 90% en el 2020 (EUROSTAT c, 2024), como se muestra en la **Figura 6**. A pesar de estas políticas, la tasa de reutilización de RCD varía significativamente entre los Estados miembros de la UE. Mientras algunos países, como los Países Bajos, Irlanda, Malta o Italia, superan el 95%, otros, como Chipre, Eslovaquia o Bulgaria tienen tasas inferiores que en el mejor de los casos alcanza el 64% de Chipre o Bulgaria que solo llega a un 24% de tasa de recuperación de los RCD. Unos datos muy por debajo del objetivo del 70% establecido para 2020 en la Directiva Marco de Residuos (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008).

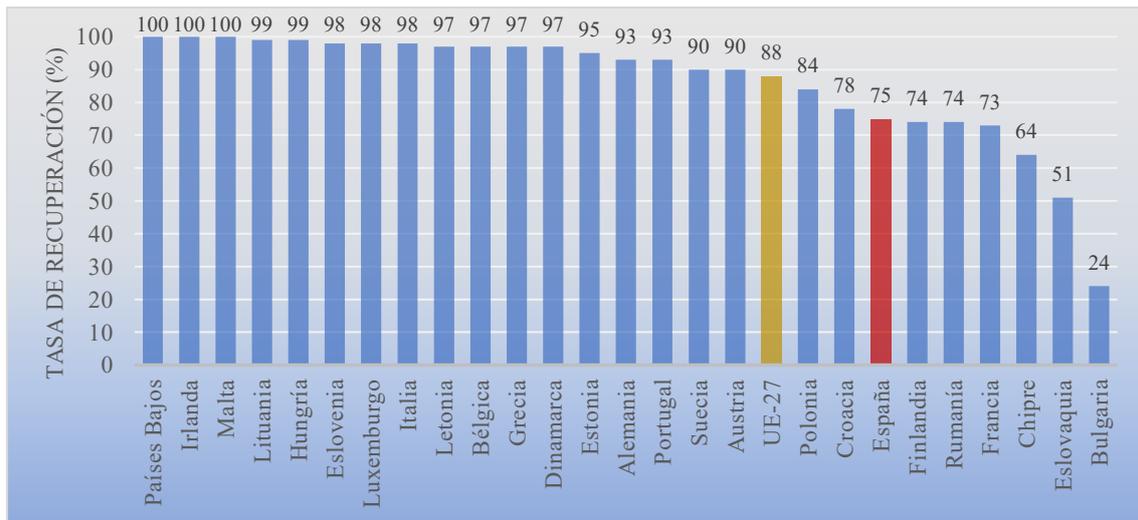


Figura 6. Tasa de recuperación de los RCD en los Estados Miembros de la UE-27 para 2018, (EUROSTAT c, 2024).

En el contexto español, pese a la numerosa legislación nacional que rige la gestión de los Residuos de Construcción y Demolición como el Real Decreto 105/2008 (Ministerio de la Presidencia, 2008), el Real Decreto 1304/2009 (Ministerio de la Presidencia, 2009), por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Jefatura del Estado, 2022) o el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022, (PEMAR) dando cumplimiento a la Directiva 2008/98/CE (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008) en el Marco de Residuos, entre otras. La tasa de recuperación a nivel nacional solo se sitúa el 75%, muy distante al de otros países comunitarios. Estas normativas nombradas anteriormente imponen obligaciones a todos los agentes involucrados en la actividad de la construcción para implementar las medidas destinadas a generar menos RCD, fomentando la reutilización, valorización y una gestión apropiada.

Los RCD son definidos de diferentes maneras según las diferentes normativas, pero todas ellas establecen un mismo significado del concepto. Por ejemplo, la Directiva del Marco Europeo 2018/851 (Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión Europea, 2018), los define como “a residuos resultantes de las actividades de construcción y demolición en general, comprende también los residuos procedentes de pequeñas actividades personales de construcción y demolición realizadas en los hogares” o respecto a normativa nacional como es el Real Decreto 105/2008 (Ministerio de la Presidencia,

2008), los define como cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse y se genere en una obra de construcción o demolición.

Así, al profundizar en la comprensión de lo que representan los RCD, es necesario destacar que son residuos muy heterogéneos, que dependen de la naturaleza de la obra, pudiendo aparecer; bien durante la limpieza del sitio, la excavación del suelo, de la construcción de estructuras o de las actividades de demolición.

Siendo compuestos, principalmente de materiales no biodegradables, tales como ladrillos, hormigón, mortero, metales, madera, plástico, vidrio, tejas, amianto, suelos excavados y mezclas bituminosas (Haque et al., 2024). Por eso es importante establecer unos criterios de clasificación, teniendo en cuenta que estos RCD se corresponden a los tipos de residuos incluidos en el capítulo 17 y con código 17 “Residuos de la Construcción y Demolición (Incluida la tierra excavada de zonas contaminadas)” establecidos en la Decisión 2014/955/UE por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo (Comisión Europea, 2014), como recoge la normativa española en el artículo 6 de la Ley 7/2022 de residuos y suelos contaminados para una economía circular (Jefatura del Estado, 2022).

De esta forma, el volumen total de estos residuos se divide principalmente en dos grandes categorías, según el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas del Ministerio de Fomento (CEDEX, 2014). La primera comprende los escombros, que constituyen aproximadamente el 75% del peso total de los RCD. Por otro lado, la segunda categoría abarca envases y otros elementos, representando el 25% restante. Para obtener una visión más detallada sobre esta clasificación, es fundamental explorar la composición porcentual de cada material, como se muestra en la **Figura 7**.

En esta figura se puede observar como el elemento mayoritario son los restos cerámicos, representando hasta el 54% del total, seguido de los restos de hormigón con un 12%. Siendo menos significativos los demás compuestos, que hacen referencia a proporciones no superiores al 7%, como es el caso de las basuras o del 5% para piedras o asfalto.

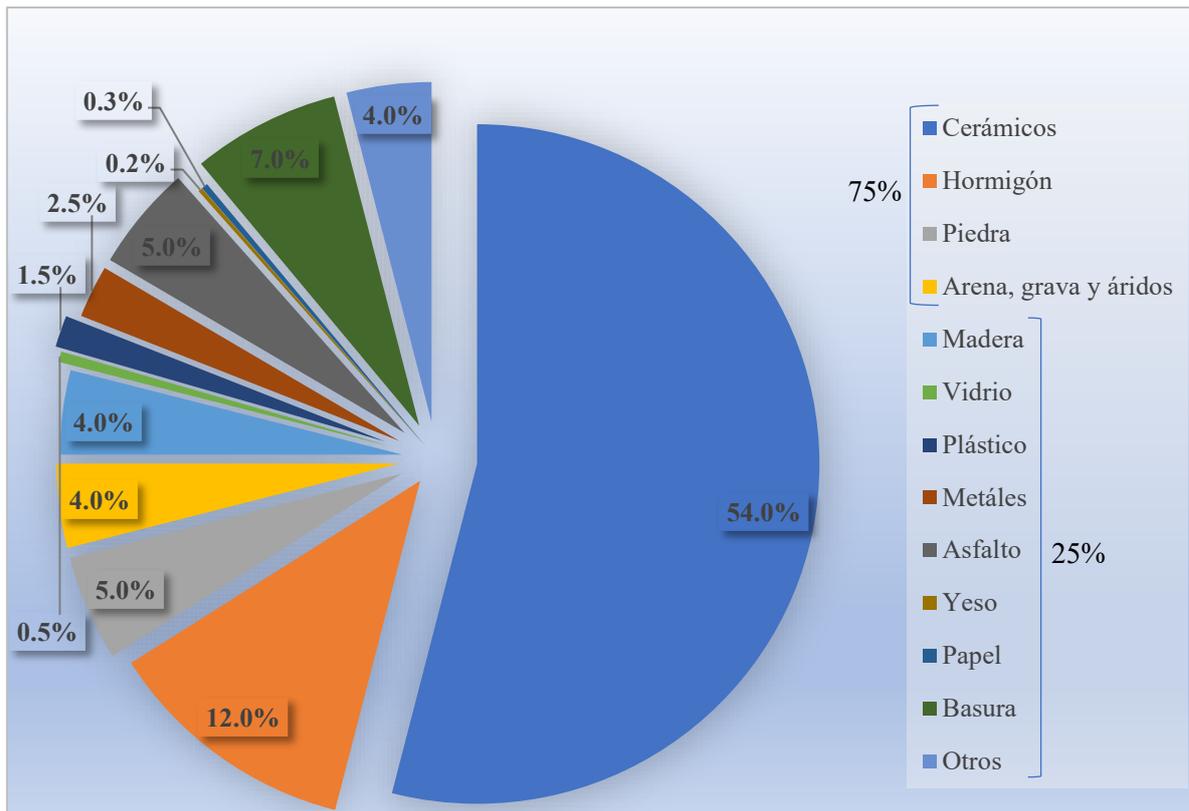


Figura 7. Composición porcentual de los RCD en España, (CEDEX, 2014).

En la actualidad, se estima que una considerable cantidad de RCD se gestionan de manera inadecuada debido a la gran heterogeneidad de estos desechos (Barbudo et al., 2020). Además otro factor que agrava este problema de la reutilización de estos residuos, es que el sector rara vez considera la utilización de estos RCD en forma de áridos reciclados (AR) como material de construcción (Villoria Saez et al., 2013) y así disminuir el consumo de nuevos materiales a partir de áridos naturales (AN). Esto está potenciado principalmente porque la calidad de los AR es variable y suelen presentar peores características que los AN, como puede ser su baja resistencia de abrasión y su alta absorción de agua o porosidad (López-Gayarre et al., 2009). Por consiguiente, esto genera una falta de confianza de este producto por parte de proyectistas y constructores, sin tener en cuenta otros factores como la falta de involucración política sobre el uso de este tipo de materiales, poniendo trabas burocráticas que están relacionadas principalmente con tenas administrativos o la falta de una cooperación fructífera entre las autoridades competentes, que genera una escasa voluntad de establecer medidas de gestión de RCD en las obras (Rodríguez-Robles et al., 2015).

Por esta razón, desde la década de 1950, y con mayor énfasis en las últimas dos décadas (Rodríguez et al., 2015), la investigación se ha centrado en evaluar la viabilidad del uso de RCD como materia prima, sin necesidad de utilizar nuevos recursos naturales, ya sea como AR en hormigón (García-González, 2016) o asfalto (Zhu et al., 2012), o como aditivos en la fabricación de cemento (Frías et al., 2024). Estos esfuerzos han demostrado que, dependiendo de la naturaleza de los RCD, entre el 50% y el 95% de los residuos producidos pueden reutilizarse como AR, generando beneficios económicos, sociales, y ambientales (Ismaeel and Kassim, 2023).

## **Hormigón con Áridos Reciclados**

El progreso en la creación de nuevos materiales, como pueden ser los hormigones desarrollados principalmente a partir del uso de residuos en lugar de las materias primas convencionales, desempeña un papel crucial en la reducción del consumo desmesurado de energía, de la explotación de recursos naturales e incluso en las emisiones de dióxido de carbono, cuyo conjunto produce la degradación ambiental de nuestro planeta (Rosales et al., 2023). Por esta razón, las estructuras de hormigón deben adaptarse a los cambios en los requisitos técnicos y de diseño, asegurando niveles óptimos de seguridad y funcionalidad a lo largo de su vida útil.

Se estima que actualmente se utilizan alrededor 14.000 millones de metros cúbicos de hormigón anualmente, convirtiéndolo en el material de construcción más prevalente a nivel mundial (Kanagaraj et al., 2024). Además, teniendo en cuenta el crecimiento demográfico y la proyección de que el 70% de la población mundial residirá en entornos urbanos para 2050 (Gürdür Broo et al., 2021), el hormigón seguirá siendo esencial en la construcción de infraestructuras y edificaciones en general. Este hecho se debe a varias razones fundamentales. En primer lugar, su alta resistencia mecánica que ofrece a las estructuras que están realizadas con este material. Otra de sus ventajas constructivas es su gran versatilidad para fabricar estructuras de hormigón armado en diversas formas y tamaños, la cual es posible gracias a su consistencia plástica en estado fresco, permitiendo

que fluya en encofrados y, una vez endurecido, ofrece una estructura sólida y resistente, ya no solamente mecánica sino también su resistencia a agentes medioambientales como el agua (García-González, 2016) y finalmente la principal razón de su popularidad radica en su costo asequible y fácil disponibilidad en el lugar de trabajo, además de su mejor desempeño en mantenimiento, resistencia al fuego y respuesta a cargas cíclicas en comparación con el acero (Kumar Mehta and Monteiro, 2014).

A pesar de estas ventajas, es esencial controlar el uso del hormigón para prevenir impactos ambientales negativos. Todos los agentes implicados en el sector de la construcción reconocen el significativo consumo de materiales naturales y los impactos ambientales adversos asociados con la fabricación del concreto (Nwankwo et al., 2020), de ahí que surja la búsqueda de alternativas integrales para circularizar la economía de la construcción, con el objetivo de prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón, reduciendo al mismo tiempo el consumo de recursos naturales y valorizando los residuos generados mediante su uso como nuevas materias primas.

La estrategia española de economía circular, España Circular 2030 (MITECO, 2020) define economía circular como *“aquella en la que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantienen en la economía durante el mayor tiempo posible, y en la que se reduce al mínimo la generación de residuos, lo que constituye una contribución esencial a los esfuerzos de la UE encaminados a lograr una economía sostenible, descarbonizada, eficiente en el uso de los recursos y competitiva”*. En este contexto, la economía circular abarca la reutilización o reciclaje de productos existentes para proporcionarles un valor añadido.

Como consecuencia de estas nuevas estrategias económicas y sostenibles las tendencias de las investigaciones realizadas en las últimas décadas promueven la utilización de los AR provenientes RCD en la fabricación de hormigón (Cantero et al., 2022). Debido a que los áridos representan alrededor de un 75% en la composición de un hormigón (Guo et al., 2018) y que la producción del mismo no solo se limita al consumo de áridos naturales, sino también, en la generación de emisiones de CO<sub>2</sub> y residuos en su fabricación (Li et al., 2015), convirtiendo la industria del hormigón una fuente de contaminación ambiental.

Este cambio de tendencia por la reutilización se atribuye más a la búsqueda actual del desarrollo sostenible en las sociedades modernas, donde el uso de estos nuevos materiales se ha introducido progresivamente en las normativas como, el Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero por el que regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición (Ministerio de la Presidencia, 2008) o el Código Estructural, aprobado en el Real Decreto 470/2021, de 29 de junio (Ministerio de la Presidencia, 2021), que al propio rendimiento de los AR.

En este marco, recientes estudios (Pacheco et al., 2019), (Makul, 2020), (Juan-Valdés et al., 2021), (Jagadesh et al., 2021), (Jagadesh et al., 2023), avalan la utilización de áridos reciclados en la fabricación de hormigón, a pesar de que su uso se puede ver limitado, ya que puede reducir las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón, en comparación con el hormigón convencional (Etxeberria et al., 2007). En general, los áridos reciclados se suelen caracterizar por su mayor porosidad, su alta capacidad de absorción de agua y su menor resistencia a abrasión (López-Gayarre et al., 2009). Esto se traduce, en que existe una relación directa entre las propiedades del hormigón y el grado de sustitución del árido grueso reciclado, siendo recomendable una sustitución menor al 20%, según el Código Estructural, aprobado en el Real Decreto 470/2021 (Ministerio de la Presidencia, 2021), mencionado anteriormente.

Es en este contexto, donde más se ha estudiado es sobre nuevas aplicaciones y porcentajes de sustitución en hormigones convencionales, para potenciar el uso de RCD. Donde, diversos estudios garantizan sustituciones mayores a las restringidas según normativa alcanzando hasta 50% e incluso 100% (Poon et al., 2004), (Domingo-Cabo et al., 2009), (Zhang and Zhao, 2014), (Bui et al., 2017), (Martínez-García et al., 2020), sin afectar a las propiedades del hormigón. Por esta razón y siguiendo la línea de la sostenibilidad y economía circular, el uso de hormigones con áridos reciclados puede ser una solución al elevado volumen de generación de RCD.

# Sílice Biogénica

La biomineralización es un fenómeno biológico que se basa en la formación de materiales inorgánicos de forma compleja, el cual se encuentra muy extendido dentro de casi todos los grupos taxonómicos que engloba los cinco reinos de los seres vivos presentes en el planeta tierra, desde el reino procariota como puede ser la formación de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  a través de bacterias magnetotácticas, hasta el reino animal con la formación de  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  en los dientes de los humanos, llegando a formar en su conjuntos hasta 60 minerales distintos (Kröger and Poulsen, 2008). Por lo tanto, se puede definir este concepto de biomineralización como aquel proceso complejo por el cual los organismos pueden formar minerales (Lowenstam and Weiner, 1989).

Este fenómeno de biomineralización, el cual influye en la capacidad de formar partes duras mineralizadas, suele caracterizar a organismos que desarrollaron una importante ventaja adaptativa de la vida en la Tierra, donde en la gran mayoría de los organismos este proceso solo se basa en formación de algunas estructuras de su anatomía, pero no llegan a formar grandes depósitos mineralizados. Sin embargo, en otros organismos consiguen formar minerales biogénicos a gran escala que consiguen tener un impacto en la biosfera, siendo componentes principales de los sedimentos marinos y afectando directamente a la formación de muchas rocas sedimentarias (Lowenstam and Weiner, 1989).

Una de las principales funciones de los minerales biogénicos es proporcionar resistencia mecánica a las partes duras de las estructuras anatómicas de los organismos que lo generan. Estos materiales resultantes se caracterizan por presentar unas propiedades mecánicas notables y suelen ser de gran interés por derecho propio para otros usos en técnicas de nano-fabricación (Losic et al., 2009).

En este campo de la biomineralización se encuentran ejemplos espectaculares de organismos eucariotas unicelulares que llegan a producir pareces celulares intrincadamente estructuradas hechas de  $\text{SiO}_2$ , como es el caso de las diatomeas, cuyo

caparazón celular, también llamado teca o frústula está compuesto entre un 60-98% por este mineral (Blanco et al., 2010).

Estas diatomeas (*Bacillariophyceae*) son unos microorganismos unicelulares y eucariotas fotosintéticos que desempeñan un papel clave en la fisiología de los ciclos biogeoquímicos de la biosfera. Estos microorganismos, actúan como productores primarios, lo que significa que sus poblaciones responden de manera rápida a los cambios en los niveles de nutrientes en su entorno (Blanco et al., 2010). Además, desempeñan un papel esencial en los ciclos de carbono y silicio de los ecosistemas (Fu et al., 2020).

En el mundo, se han identificado aproximadamente  $10^5$  especies distintas de diatomeas (Rimet and Bouchez, 2012), y cada una de ellas muestra una adaptación específica a ciertos rangos autoecológicos. Esta adaptación permite establecer una conexión evidente entre la composición de la comunidad de diatomeas y los parámetros fisicoquímicos del entorno en el cual se desarrollan. (Alegre et al., 2014). Estos seres vivos presentan arquitecturas de frústula únicas donde cada una de las especies forma una pared celular de sílice estéticamente esculpida diferente que exhibe nano y micropatrones altamente diferenciados dependiendo de cada especie, como se puede observar en la **Figura 8** que resultan instructivas para sus propiedades mecánicas, así como para la construcción de materiales avanzados con muchas aplicaciones prácticas diferentes (Losic et al., 2009).

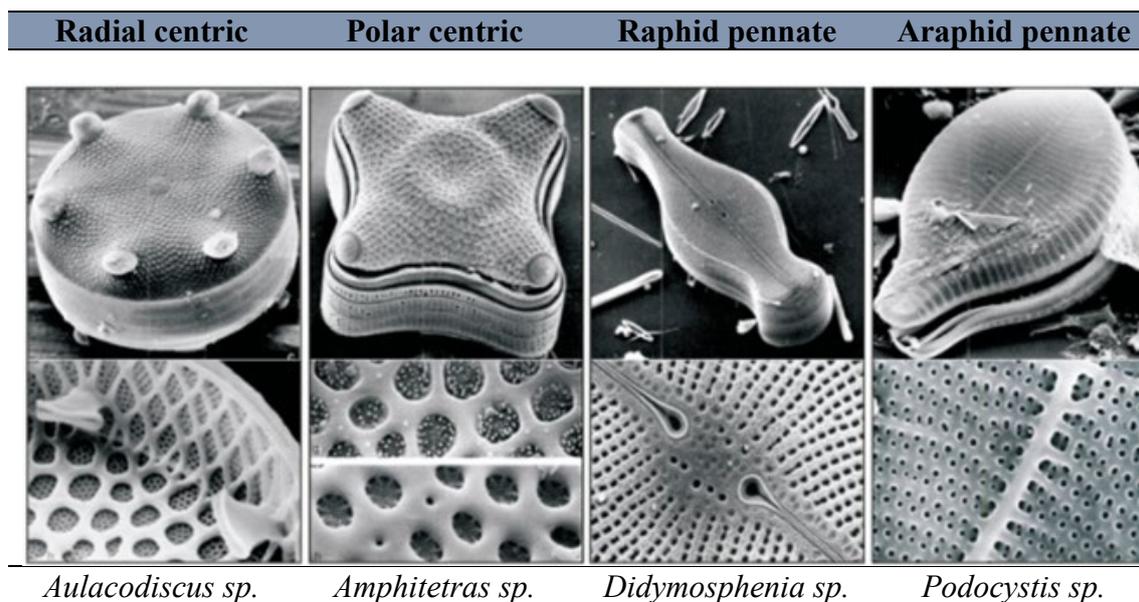


Figura 8. Estructura y biogénesis de las paredes celulares de las diatomeas. Fuente: (Kröger and Poulsen, 2008).

Las diatomeas son los organismos que más participan en el proceso de biosilicificación, tanto por el número de estructuras silicificadas que pueden producir como por la producción global de sílice biogénica (Terracciano et al. 2018), su acumulación durante miles de años forma en la naturaleza de forma espontánea las denominadas diatomitas, rocas silíceas de las cuales se extrae la tierra de diatomeas. De esta forma las diatomeas han dominado así la combinación de dos capacidades de las cuales se basan en la biosíntesis de estructuras complejas y la variación aparentemente infinita de este proceso, originando infinidad de estructuras. Por lo tanto, es importante entender el mecanismo de las diatomeas por el cual las células eucariotas ensamblan la maquinaria celular para ejecutar estas estructuras morfogenéticas.

En muchas especies, esta parte diferenciadora taxonómicamente (valva) presenta un surco delgado llamado rafe, que atraviesa toda la teca longitudinalmente y permite la locomoción de las células, ya que debajo de él se encuentra un orgánulo en forma de cinta. Este orgánulo está compuesto por fibrillas que pueden contraerse de manera rítmica y provoca la secreción de una sustancia adhesiva a través de los poros terminales, la cual se desplaza a lo largo de la hendidura. Además, se puede encontrar otras partes como son las areolas que son varias series de líneas de perforaciones, las cuales se encuentran perpendicular al rafe y cuya sucesión de estas en cada línea forma la estría (Álvarez Blanco, 2009).

Dentro de la rica variabilidad taxonómica de estas algas unicelulares, se encuentran diversas especies que exhiben notables variaciones en su morfología y comportamiento, donde se hallan especies cuyas células pueden estar solitarias o unidas en colonias, de las cuales en algunas ocasiones pueden alcanzar tamaños macroscópicos, como es el caso de *Diatoma*, *Melosira* y *Didymosphenia* (Eloranta and Soininen, 2002). En ambos casos, estas microalgas pueden existir en diversas formas de vida flotando libremente sobre la columna de agua, catalogadas como planctónicas, mientras que otras optan por habitar en el fondo acuático, adoptando la designación de bentónicas. En este último grupo, particularmente en las denominadas diatomeas bentónicas perifíticas, se manifiesta un ciclo de vida estrechamente ligado a un tipo específico de sustrato al que se adhieren, que, por su diversidad se refleja en su clasificación, la cual se divide en tres grupos principales: epilíticas, asociadas a sustratos rocosos; epifíticas, que se vinculan a sustratos vegetales; y epipélicas, que encuentran su hábitat en sustratos sedimentarios (Ciutti, 2005). Esta

variabilidad en las formas de vida y su adaptación a diferentes sustratos contribuyen significativamente a la complejidad y la riqueza de los ecosistemas acuáticos en los que estas diatomeas prosperan.

En este contexto, muchas especies son capaces de adherirse a superficies sumergidas, incluidas las estructuras submarinas construidas por el hombre, formando revestimientos denominados biopelículas, como el estudio de Lacoursière et al. (2011) quienes demostraron que pueden establecerse colonias de diatomeas en sustratos artificiales en tan solo cuatro semanas formando un recubrimiento superficial. Estas biopelículas suelen estar dominadas por diatomeas perifíticas móviles y sus secreciones (mucílagos adhesivos formados por sustancias poliméricas extracelulares o EPS) (Molino and Wetherbee, 2008). Las diatomeas suelen iniciar la colonización de estas superficies, aunque los mecanismos implicados siguen sin estar caracterizados (Fu et al., 2020). Por lo general el proceso de adhesión de las diatomeas comienza con una fase inicial que incluye el desarrollo de un recubrimiento primario formado por materia orgánica coloidal, polisacáridos y proteínas. A esto le sigue inmediatamente la acumulación de microorganismos (bacterias, diatomeas, hongos y otras microalgas) y la secreción de EPS en sus superficies celulares durante la adhesión, colonización y crecimiento de la población (Anil et al., 2006). De esta forma, las diatomeas al entrar en contacto con la superficie y adherirse a ella, migran a zonas que ofrecen las condiciones ambientales más adecuadas y productivas (Molino and Wetherbee, 2008), que por norma general suelen ser grietas y nichos de la superficie, que proporcionan protección frente a las fuerzas de cizallamiento hidrodinámicas, ya que pueden afectar significativamente a la adhesión en la superficie del sustrato y con ello al desarrollo de la comunidad ecológica de las diatomeas adheridas (Sullivan and Regan 2011). Así, su distribución a lo largo de la biopelícula es heterogénea, con variaciones a microescala (Anil et al., 2006), de modo que la rugosidad de la superficie y la microtopografía influyen significativamente en las tasas de crecimiento y la fuerza de adhesión de las diatomeas (Sullivan and Regan 2011).

Hasta la fecha, la investigación se ha centrado en la comprensión de los procesos implicados en el desarrollo inicial de la biopelícula, la morfología y la bioquímica de las estructuras de adhesión, las propiedades mecánicas de los adhesivos y el estudio de la fuerza de adhesión de células enteras a las superficies de diferentes composiciones químicas (Molino and Wetherbee, 2008). Comprender y mejorar las interacciones entre

las infraestructuras que se encuentran sumergidas y los componentes biológicos que se depositan en ellos sigue siendo uno de los retos de la ingeniería ecológica (Georges et al., 2022). En este sentido, el presente trabajo se centra en el uso de biodepósitos de conchas celulares de diatomeas como recubrimiento sobre elementos de base cemento cuyo efecto cubriente puede aportar propiedades sellantes o reparadoras a estos materiales, evitando el uso de materias primas tradicionales en operaciones de reparación o mantenimiento.

## **Biodeposición de Sílice Biogénica**

El principal problema que pone a prueba la durabilidad de las estructuras de hormigón suele ser originada por un deterioro gradual de sus materiales sobre la superficie. Aunque inicialmente este deterioro no genera amenazas inmediatas a la seguridad, con el tiempo puede convertirse en un peligro potencial para la integridad de toda la estructura, lo que puede suponer un coste importante para su mantenimiento.

En las últimas décadas, se ha llevado a cabo una extensa investigación para abordar este impacto económico derivado de los problemas de durabilidad, donde, se han propuesto diversos métodos con el objetivo de proporcionar estructuras de hormigón más robustas y duraderas. Estas estrategias se han centrado principalmente en retrasar su degradación a través de la reducción de su porosidad y densificación de su matriz interna, a través de la disminución de la relación agua-cemento y la adición o sustitución de parte del cemento dosificado para la mezcla para mejorar sus propiedades, con el uso de nanopartículas (Pan et al., 2017). No obstante, este último enfoque presenta desventajas significativas. En primer lugar, la protección ofrecida podría no ser suficiente en entornos altamente agresivos, como ambientes marinos, terrestres salinos y alcalinos, así como en zonas frías donde las condiciones climáticas extremas pueden comprometer la eficacia de las medidas adoptadas, no siendo aplicables a estructuras antiguas y por otro lado, este método a menudo conduce a sobrediseñar toda la estructura (Pacheco-Torgal and Jalali, 2009), (Pour-Ali et al., 2015).

Para abordar estas limitaciones se han explorado enfoques más económicos destinados a proporcionar una protección adicional contra la degradación de los materiales, basados en sistemas para la protección superficial del hormigón, con el fin de aumentar su durabilidad, tanto para el hormigón nuevo como para los trabajos de mantenimiento y de reparación. Según el Código Estructural (Ministerio de la Presidencia, 2021) en su apartado 43.3.1.3 estos sistemas de protección superficial deben *“impedir que se den las condiciones electroquímicas necesarias (presencia de oxígeno y agua), para que se impida el proceso corrosivo, o dificulte el ingreso de sustancia agresivas (anhídrido carbónico, iones cloruro, etc.) de forma que se ralentice el desarrollo de la corrosión”*.

Dentro de estos tratamientos superficiales es importante distinguir entre distintos conceptos como se definen en la norma UNE-EN 1504-2 (AENOR, 2013). En dicha norma, la “impregnación hidrófoba” se refiere al tratamiento del hormigón con el propósito de crear una superficie repelente al agua. En este proceso, la superficie interna de los poros y capilares se recubre, pero no se llenan, no se forma una película en la superficie del hormigón, y su aspecto puede modificarse ligeramente o no cambiar en absoluto. La “impregnación”, por otro lado, se dirige a reducir la porosidad superficial y fortalecer la superficie del hormigón. En este caso, los poros y capilares pueden estar parcial o completamente llenos. Finalmente, el “revestimiento” es un tratamiento diseñado para generar una capa protectora continua en la superficie del hormigón. Estas definiciones claras ayudan a comprender las distintas estrategias disponibles para proteger el hormigón, cada una adaptada a necesidades específicas, la cuales se pueden ver representadas en la **Figura 9**.

---

***Impregnación hidrófoba***

---

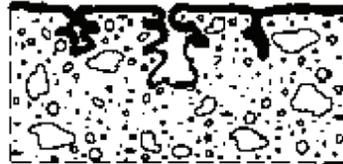


Representación esquemática de una impregnación hidrófoba típica.

---

***Impregnación***

---

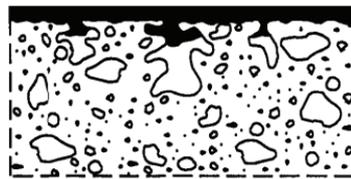


Representación esquemática de una impregnación típica.

---

***Revestimiento***

---



Representación esquemática de un revestimiento típico.

---

***Figura 9. Tipos de tratamientos superficiales en hormigón según la norma UNE-EN 1504-2 (AENOR, 2013).***

En el contexto actual, el tratamiento de superficies de hormigón ha adquirido reconocimiento gracias a su eficacia para prevenir la penetración de sustancias agresivas (Sánchez et al., 2018). Aunque esta técnica ha sido desarrollada por la humanidad desde tiempos remotos, con la aplicación de diversos tratamientos superficiales como elementos protectores en edificios y materiales constructivos, es interesante observar que algunas de estas prácticas datan de épocas ancestrales.

Un ejemplo destacado es la protección por biomateriales mediante extractos de cactus y otros productos de origen natural (Shanmugavel et al., 2020), utilizados como agentes sellantes o hidrofugantes en fachadas, cubiertas, etc., entre otros. Siendo esta práctica muy común en varias civilizaciones durante cientos de años. Sin embargo, en los últimos tiempos, estas prácticas tradicionales han sido desplazadas por el uso predominante de polímeros artificiales (Van Tittelboom et al., 2010).

A pesar de que estos nuevos polímeros artificiales pueden ofrecer efectos similares o incluso superiores a los biomateriales, su uso está siendo cuestionado en la actualidad debido a sus considerables inconvenientes medioambientales, su persistencia a lo largo del tiempo y sus efectos perjudiciales para el ecosistema en términos de flora, fauna y, por supuesto, para la especie humana, como ha sido señalado por estudios como el de Mamo y Mattiasson (2020). Este cambio en la perspectiva hacia prácticas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente destaca la necesidad de explorar y valorar métodos tradicionales que, a lo largo de la historia, han demostrado ser eficientes y respetuosos con el entorno.

En la búsqueda continua por mejorar las propiedades de los hormigones, actualmente se han propuesto diversas técnicas de tratamiento superficial, tanto de naturaleza biológica como mediante el uso de nanomateriales sintetizados en laboratorio. En el campo biológico destacan investigaciones sobre biodeposiciones de  $\text{CaCO}_3$  producidas por bacterias (De Muynck et al., 2008), (Salmasi and Mostofinejad, 2020), (Cappellesso et al., 2023), (Parashar and Nagar, 2023), (Mondal and Ghosh, 2023), (Aytekin et al. 2023). Por otro lado, en el ámbito de los nanomateriales, se han llevado a cabo diversos estudios centrados en el uso de nanosílice coloidal como elemento protector de elementos base cemento (Franzoni et al. 2013), (Hou et al., 2014), (Fajardo et al., 2015), (Ardalan et al., 2017), (Shirzadi Javid et al., 2019), (Li et al., 2022), (Tabish et al., 2023). Estos tratamientos hidrofugantes y de sellado de poros han conseguido aumentar la impermeabilidad, demostrado ser efectivos para mejorar la durabilidad del hormigón y su capacidad para resistir la acción de los agentes agresivos.

Sin embargo, una opción interesante y poco explorada en el ámbito de la construcción es el cultivo de diatomeas como una biodeposición de sílice biogénica, ya que su anatomía propia les confiere una capacidad interesante para ser utilizadas como fábricas microscópicas de nanofabricación de sílice (Losic et al., 2009). Lo que hace aún más atractiva esta propuesta es su capacidad para combinar ambas técnicas mencionadas anteriormente, combinando la biodeposición, con el uso de nanomateriales en forma de nanosílice biológico, siendo un material mucho más resistente que el  $\text{CaCO}_3$  depositado por bacterias.

Este método de biodeposición de sílice biogénica sobre hormigones consiste en un proceso simple como se muestra en la **Figura 10**, donde:

(1) Tras la preparación de las muestras de hormigón para promover el crecimiento de las diatomeas, (2) las muestras se distribuyen y se sumergen de manera uniforme en la superficie un estanque acuático, estando siempre a la misma profundidad con el objetivo de minimizar las variaciones entre ellas con la cara de estudio orientada de forma paralela a la superficie del agua, para fomentar la biodeposición. Con condiciones óptimas y temperatura y luz, manteniendo fotoperiodos positivos y con niveles de nutrientes aceptables para su desarrollo. (3) Finalmente, tras pasar el periodo óptimo de desarrollo (3 meses), las muestras son retiradas con el biofilm formado de sílice biogénica en su superficie, como se muestra en la ampliación de la imagen a través de microscopio electrónico de barrido (SEM).



*Figura 10. Método completo de biodeposición en la superficie de hormigones.*

Hasta ahora no se ha explorado el enorme potencial de las diatomeas, como tratamiento protector para el hormigón ya que han sido solo objeto de estudios previos como recubrimiento autolimpiante para vidrio, cerámica o vitrocerámica (Axtell III et al., 2006). Por ello, en la presente tesis se aborda esta brecha en el conocimiento científico, evaluando el efecto del tratamiento superficial mediante la biodeposición de sílice biogénica generada por las diatomeas en el hormigón reciclado expuesto a sus principales agentes de deterioro. Los hallazgos encontrados podrían tener implicaciones

significativas en la construcción de infraestructuras hidráulicas sostenibles y duraderas, donde la eficacia de este tratamiento biológico podría mejorar la calidad y la durabilidad del hormigón reciclado, contribuyendo con la estrategia española de bioeconomía para el horizonte 2030 (MITECO, 2015), la cual define la bioeconomía como el conjunto de actividades económicas que generan productos y servicios, aportando valor económico mediante el uso eficiente y sostenible de recursos de origen biológico. Dicha bioeconomía circular contribuye a la reutilización o reciclaje de productos existentes para proporcionarles un valor añadido, lo que permitiría el uso de los hormigones reciclados mejorados con biodeposición de sílice biogénica con uso generalizado en la construcción de infraestructuras, reduciendo significativamente el impacto ambiental asociado a la producción de hormigón convencional.

# Referencias

- Alegre, E., Blanco, S., Castejón, M., López, R., Sánchez, L., 2014. Segmentación autónoma y extracción de características geométricas en diatomeas.
- Álvarez Blanco, I., 2009. Las diatomeas fluviales epilíticas de la parte española de la cuenca del Duero, aspectos ecológicos, florísticos y biogeográficos. Ph.D. Tesis, Universidad de León.
- Anil, A.C., Patil, J.S., Mitbavkar, S., Silva, S.D., Hegde, S., Naik, R., 2006. Role of Diatoms in Marine Biofouling. *Recent Adv. Appl. Asp. Indian Mar. Algae with Ref. to Glob. Scenar.* 1, 351–365.
- Ardalan, R.B., Jamshidi, N., Arabameri, H., Joshaghani, A., Mehrinejad, M., Sharafi, P., 2017. Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO<sub>2</sub> oxide and spraying nanosilicon practices. *Constr. Build. Mater.* 146, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.078>
- Axtell III, E., Sakoske, G., Swiler, D., Hensel, M., Baumann, M., Matalka, D., Nuccetelli, G., 2006. Structured Self-Cleaning Surfaces and Method of Forming Same. *Eur. J. Polit. Res. Polit. Data Yearb. US* 2006/0246277.
- Aytekin, B., Mardani, A., Yazıcı, Ş., 2023. State-of-art review of bacteria-based self-healing concrete: Biomineralization process, crack healing, and mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* 378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131198>
- Barbudo, A., Ayuso, J., Lozano, A., Cabrera, M., López-Uceda, A., 2020. Recommendations for the management of construction and demolition waste in treatment plants. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 27, 125–132. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05578-0>
- Blanco, S., Cejudo-Figueiras, C., Álvarez-Blanco, I., Bécares, E., Hoffmann, L., Ector, L., 2010. Atlas de las diatomeas de la cuenca del Duero. Área Publicaciones. León Universidad de León.
- Brundtland, G.H., ONU, 1987. Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común.
- Bui, N.K., Satomi, T., Takahashi, H., 2017. Improvement of mechanical properties of

- recycled aggregate concrete basing on a new combination method between recycled aggregate and natural aggregate. *Constr. Build. Mater.* 148, 376–385. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.084>
- Cantero, B., Sáez del Bosque, I.F., Sánchez de Rojas, M.I., Matías, A., Medina, C., 2022. Durability of concretes bearing construction and demolition waste as cement and coarse aggregate substitutes. *Cem. Concr. Compos.* 134. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104722>
- Cappelleso, V.G., Van Mullem, T., Gruyaert, E., Van Tittelboom, K., De Belie, N., 2023. Bacteria-based self-healing concrete exposed to frost salt scaling. *Cem. Concr. Compos.* 139, 105016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105016>
- CEDEX, 2014. FICHA TÉCNICA. Residuos de construcción y demolición. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Ministerio de Fomento, España.
- Ciutti, F., 2005. Il monitoraggio dei corsi d'acqua con indicatori algali (diatomee). *Ann. Ist. Super. Sanita* 41, 393–397.
- Comisión Europea, 2014. 2014/955/UE: Decisión de la Comisión, de 18 de diciembre de 2014, por la que se modifica la Decisión 2000/532/CE, sobre la lista de residuos, de conformidad con la Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 30-12-2014(370), 43.
- Comisión Europea, 2011. Comunicación de la Comisión Al Parlamento Europeo, El Consejo, El Comité Económico Y Social Europeo Y El Comité De Las Regiones. Estrategia Europa 2020 y la Iniciativa Emblemática «Una Europa Que Utilice Eficazmente Los Recursos» 26.1.201. Bélgica, Bruselas.
- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., Verstraete, W., 2008. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* 38, 1005–1014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.005>
- Domingo-Cabo, A., Lázaro, C., López-Gayarre, F., Serrano-López, M.A., Serna, P., Castaño-Tabares, J.O., 2009. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 23, 2545–2553. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.018>
- Eloranta, P., Soininen, J., 2002. Ecological status of some Finnish rivers evaluated using benthic diatom communities. *J. Appl. Phycol.* 14, 1–7.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., Barra, M., 2007. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate

- concrete. Cem. Concr. Res. 37, 735–742.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>
- EUROSTAT a, 2024. Generation of waste by economic activity (online data code: TEN00106).  
<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00106/default/table?lang>
- EUROSTAT b, 2024. Generation of waste by waste category, hazardousness and NACE Rev. 2. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_wasgen/default/table?l](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_wasgen/default/table?l)
- EUROSTAT c, 2024. Eurostat-DATABASE. Eurostat-Your key to European Statistics. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database>
- Fajardo, G., Cruz-López, A., Cruz-Moreno, D., Valdez, P., Torres, G., Zanella, R., 2015. Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cement-based materials. *Constr. Build. Mater.* 76, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.054>
- Franzoni, E., Pigino, B., Pistolesi, C., 2013. Ethyl silicate for surface protection of concrete: Performance in comparison with other inorganic surface treatments. *Cem. Concr. Compos.* 44, 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.008>
- Frías, M., Guerrero, A., Monasterio, M., Insignares, Á., Sánchez de Rojas, M.I., 2024. Viability of using limestone concrete waste from CDW to produce ternary cements type LC3. *Constr. Build. Mater.* 411. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134362>
- Fu, W., Chaiboonchoe, A., Dohai, B., Sultana, M., Baffour, K., Alzahmi, A., Weston, J., Al Khairy, D., Daakour, S., Jaiswal, A., Nelson, D.R., Mystikou, A., Brynjolfsson, S., Salehi-Ashtiani, K., 2020. GPCR Genes as Activators of Surface Colonization Pathways in a Model Marine Diatom. *iScience* 23, 101424. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2020.101424>
- García-González, J., 2016. Hormigón elaborado con residuos de construcción y demolición mixtos cerámicos: Optimización de sus propiedades físicas, mecánicas y durables mediante pre-saturación de los áridos, uso de superplastificantes y precipitación microbiológica de carbonato cálc. [Ph.D. Thesis, Universidad de León].
- Georges, M., Bourguiba, A., Boutouil, M., Chateigner, D., Jolly, O., Claquin, P., 2022. Interaction between the diatom *Cylindrotheca closterium* and a siliceous mortar in a silica-limited environment. *Constr. Build. Mater.* 321, 126277. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126277>
- Guo, Z., Tu, A., Chen, C., Lehman, D.E., 2018. Mechanical properties, durability, and

- life-cycle assessment of concrete building blocks incorporating recycled concrete aggregates. *J. Clean. Prod.* 199, 136–149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.069>
- Gürdür Broo, D., Lamb, K., Ehwi, R.J., Pärn, E., Koronaki, A., Makri, C., Zomer, T., 2021. Built environment of Britain in 2040: Scenarios and strategies. *Sustain. Cities Soc.* 65. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102645>
- Haque, S.E., Nahar, N., Haque, M.S., 2024. A study on the waste generation rates and recycling potential for the construction and demolition waste in Dhaka, Bangladesh. *Environ. Monit. Assess.* 196. <https://doi.org/10.1007/s10661-024-12329-3>
- Hou, P., Cheng, X., Qian, J., Shah, S.P., 2014. Effects and mechanisms of surface treatment of hardened cement-based materials with colloidal nanoSiO<sub>2</sub> and its precursor. *Constr. Build. Mater.* 53, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.062>
- Ismaeel, W.S.E., Kassim, N., 2023. An environmental management plan for construction waste management. *Ain Shams Eng. J.* 14, 102244. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102244>
- Jagadesh, P., Juan-Valdés, A., Guerra-Romero, M.I., Morán-Del Pozo, J.M., García-González, J., Martínez-García, R., 2021. Effect of design parameters on compressive and split tensile strength of self-compacting concrete with recycled aggregate: An overview. *Appl. Sci.* 11, 6028. <https://doi.org/10.3390/app11136028>
- Jagadesh, P., Karthik Prabhu, T., de Prado-Gil, J., Baladrón-Blanco, V., Merino-Maldonado, D., Antolín-Rodríguez, A., Juan-Valdés, A., Martínez-García, R., 2023. Circular Economy Policies in the Concrete Production, *Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences*. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-25840-4\\_50](https://doi.org/10.1007/978-3-031-25840-4_50)
- Jefatura del Estado, 2022. Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular. *Boletín Oficial del Estado, España*, 9-4-2022 (85).
- Juan-Valdés, A., Rodríguez-Robles, D., García-González, J., de Rojas, M.I.S., Guerra-Romero, M.I., Martínez-García, R., Morán-Del Pozo, J.M., 2021. Recycled precast concrete kerbs and paving blocks, a technically viable option for footways. *Materials (Basel)*. 14. <https://doi.org/10.3390/ma14227007>
- Kanagaraj, B., Anand, N., Johnson Alengaram, U., Samuvel Raj, R., Karthick, S., 2024. Limestone calcined clay cement (LC3): A sustainable solution for mitigating environmental impact in the construction sector. *Resour. Conserv. Recycl. Adv.* 21, 200197. <https://doi.org/10.1016/j.rcradv.2023.200197>

- Kröger, N., Poulsen, N., 2008. Diatoms - From cell wall biogenesis to nanotechnology. *Annu. Rev. Genet.* 42, 83–107. <https://doi.org/10.1146/annurev.genet.41.110306.130109>
- Kumar Mehta, P., Monteiro, P.J.M., 2014. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th Editio. ed. McGraw-Hill Education, New York.
- Lacoursière, S., Lavoie, I., Rodríguez, M.A., Campeau, S., 2011. Modeling the response time of diatom assemblages to simulated water quality improvement and degradation in running waters. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 68, 487–497. <https://doi.org/10.1139/F10-162>
- Li, T., Wu, Y., Wu, H., 2022. A Study on Impact of Different Surface Treatment Agents on the Durability of Airport Pavement Concrete. *Coatings* 12, 1–21. <https://doi.org/10.3390/coatings12020162>
- Li, W., Xiao, J., Shi, C., Poon, C.S., 2015. Structural behaviour of composite members with recycled aggregate concrete - An overview. *Adv. Struct. Eng.* 18, 919–938. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.18.6.919>
- López-Gayarre, F., Serna, P., Domingo-Cabo, A., Serrano-López, M.A., López-Colina, C., 2009. Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. *Waste Manag.* 29, 3022–3028. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.07.010>
- Losic, D., Mitchell, J.G., Voelcker, N.H., 2009. Diatomaceous lessons in nanotechnology and advanced materials. *Adv. Mater.* 21, 2947–2958. <https://doi.org/10.1002/adma.200803778>
- Lowenstam, H.A., Weiner, S., 1989. *Introduction, On Biomineralization*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195049770.003.0003>
- Makul, N., 2020. Cost-benefit analysis of the production of ready-mixed high-performance concrete made with recycled concrete aggregate: A case study in Thailand. *Heliyon* 6, e04135. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04135>
- Martínez-García, R., Guerra-Romero, I.M., Morán-del Pozo, J.M., de Brito, J., Juan-Valdés, A., 2020. Recycling aggregates for self-compacting concrete production: A feasible option. *Materials (Basel)*. 13. <https://doi.org/10.3390/ma13040868>
- Mattiasson, G.M. and B., 2020. “Alkaliphiles: The Emerging Biological Tools Enhancing Concrete Durability,” *SpringerLink*, vol. 172, p. 293-342, 2020.
- Ministerio de la Presidencia, 2021. Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se

- aprueba el Código Estructural. Boletín Oficial del Estado, España, 13-08- 2021(190), 1789.
- Ministerio de la Presidencia, 2008. Real Decreto 105/2008, de 1 de febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición. Boletín Oficial del Estado, España, 13-2-2008(38), 7724-7730.
- Ministerio de la Presidencia, 2009. Real Decreto 1304/2009, de 31 de julio, por el que se modifica el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante el depósito en vertedero. Boletín Oficial del Estado, España, 1-8-2009 (185), 65671-65672.
- MITECO, 2020. La estrategia española de economía circular, España Circular 2030.
- MITECO, 2015. Estrategia española de Bioeconomía. Horizonte 2030.
- Molino, P.J., Wetherbee, R., 2008. The biology of biofouling diatoms and their role in the development of microbial slimes. *Biofouling* 24, 365–379. <https://doi.org/10.1080/08927010802254583>
- Mondal, S., Ghosh, A. (Dey), 2023. Biomineralization, bacterial selection and properties of microbial concrete: A review. *J. Build. Eng.* 73, 106695. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106695>
- Naciones Unidas, 2023. Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, Agenda 2030.
- Naciones Unidas, 1992. Long-range World Population Projections: Two Centuries of Population Growth 1950-2150. United Nations, New York.
- Nadazdi, A., Naunovic, Z., Ivanisevic, N., 2022. Circular Economy in Construction and Demolition Waste Management in the Western Balkans: A Sustainability Assessment Framework. *Sustain.* 14, 871. <https://doi.org/10.3390/su14020871>
- Nwankwo, C.O., Bamigboye, G.O., Davies, I.E.E., Michaels, T.A., 2020. High volume Portland cement replacement: A review. *Constr. Build. Mater.* 260, 120445. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120445>
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., 2009. Sulphuric acid resistance of plain, polymer modified, and fly ash cement concretes. *Constr. Build. Mater.* 23, 3485–3491. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.001>
- Pacheco, J., de Brito, J., Chastre, C., Evangelista, L., 2019. Experimental investigation on the variability of the main mechanical properties of concrete produced with coarse recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* 201, 110–120.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.200>

Pan, X., Shi, Z., Shi, C., Ling, T.C., Li, N., 2017. A review on concrete surface treatment Part I: Types and mechanisms. *Constr. Build. Mater.* 132, 578–590. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.025>

Parashar, A.K., Nagar, P., 2023. Effect of Bacillus Family Bacteria on the Mechanical and Durability Properties of Concrete Mix: A Review, in: Engineering, L.N. in M. (Ed.), Shukla, A.K., Sharma, B.P., Arabkoohsar, A., Kumar, P. (Eds) *Recent Advances in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, pp. 521–530. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-1894-2>

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2008. Directiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre de 2008 , sobre los residuos y por la que se derogan determinadas Directivas. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 19-12-2014(365).

Parlamento Europeo y El Consejo de la Unión Europea, 2018. Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 30 de mayo de 2018, por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 14-6-2018(150).

PEMAR, 2016. Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos 2016-2022. Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, España.

Plaza, P., Sáez del Bosque, I.F., Frías, M., Sánchez de Rojas, M.I., Medina, C., 2021. Use of recycled coarse and fine aggregates in structural eco-concretes. Physical and mechanical properties and CO2 emissions. *Constr. Build. Mater.* 285, 122926. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122926>

Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C., 2004. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *Cem. Concr. Res.* 34, 31–36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)

Pour-Ali, S., Dehghanian, C., Kosari, A., 2015. Corrosion protection of the reinforcing steels in chloride-laden concrete environment through epoxy/polyaniline-camphorsulfonate nanocomposite coating. *Corros. Sci.* 90, 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2014.10.015>

Rimet, F., Bouchez, A., 2012. Life-forms, cell-sizes and ecological guilds of diatoms in European rivers. *Knowl. Manag. Aquat. Ecosyst.* 1–12. <https://doi.org/10.1051/kmae/2012018>

Rodríguez-Robles, D., García-González, J., Juan-Valdés, A., Morán-Del Pozo, J.M.,

- Guerra-Romero, M.I., 2015. Overview regarding construction and demolition waste in Spain. *Environ. Technol. (United Kingdom)* 36, 3060–3070. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.957247>
- Rodríguez, G., Medina, C., Alegre, F.J., Asensio, E., De Sánchez Rojas, M.I., 2015. Assessment of Construction and Demolition Waste plant management in Spain: In pursuit of sustainability and eco-efficiency. *J. Clean. Prod.* 90, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.067>
- Rosales, M., Agrela, F., Sánchez de Rojas, M.I., Cabrera, M., Rosales, J., 2023. Optimisation of hybrid eco-efficient mortars with aggregates from construction and demolition waste and olive biomass ash. *Constr. Build. Mater.* 400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132634>
- Salmasi, F., Mostofinejad, D., 2020. Investigating the effects of bacterial activity on compressive strength and durability of natural lightweight aggregate concrete reinforced with steel fibers. *Constr. Build. Mater.* 251, 119032. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119032>
- Sánchez, M., Faria, P., Ferrara, L., Horszczaruk, E., Jonkers, H.M., Kwiecień, A., Mosa, J., Peled, A., Pereira, A.S., Snoeck, D., Stefanidou, M., Stryzewska, T., Zajac, B., 2018. External treatments for the preventive repair of existing constructions: A review. *Constr. Build. Mater.* 193, 435–452. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.173>
- Shanmugavel, D., Selvaraj, T., Ramadoss, R., Raneri, S., 2020. Interaction of a viscous biopolymer from cactus extract with cement paste to produce sustainable concrete. *Constr. Build. Mater.* 257, 119585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119585>
- Shirzadi Javid, A.A., Ghoddousi, P., Zareechian, M., Habibnejad Korayem, A., 2019. Effects of Spraying Various Nanoparticles at Early Ages on Improving Surface Characteristics of Concrete Pavements. *Int. J. Civ. Eng.* 17, 1455–1468. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00407-4>
- Sullivan, T., & Regan, F., 2011. Novel materials for mitigation of diatom biofouling on marine sensors. *Instrumentation ViewPoint*. 11 39.
- Tabish, M., Zaheer, M.M., Baqi, A., 2023. Effect of nano-silica on mechanical, microstructural and durability properties of cement-based materials: A review. *J. Build. Eng.* 65, 105676. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105676>
- Terracciano, M., De Stefano, L., Rea, I., 2018. Diatoms green nanotechnology for biosilica-based drug delivery systems. *Pharmaceutics* 10, 1–15.

<https://doi.org/10.3390/pharmaceutics10040242>

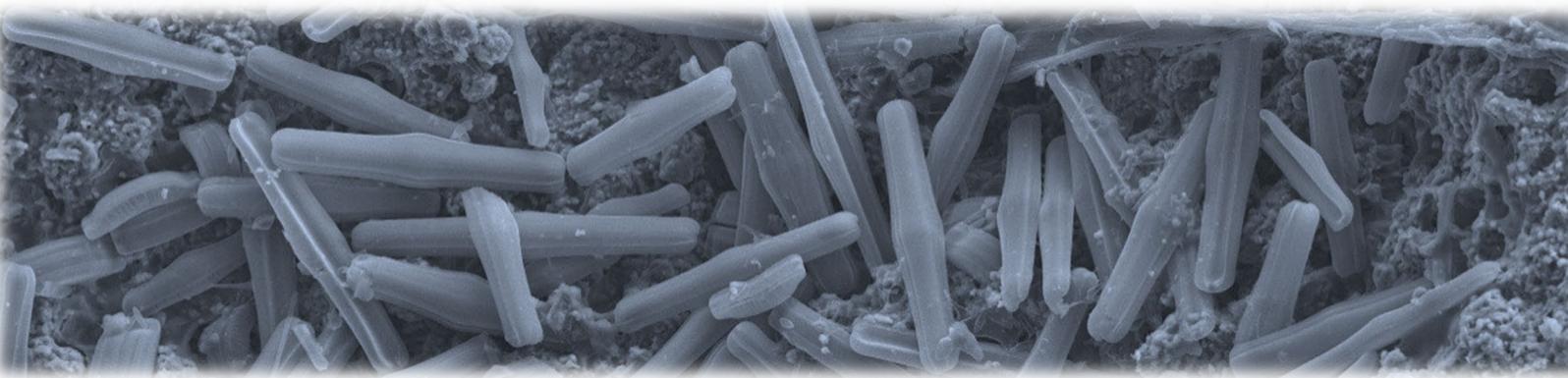
UNE-EN 1504-2. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Definiciones, requisitos, control de calidad y evaluación de la conformidad. Parte 2: Sistemas de protección superficial para el hormigón, 2013.AENOR. Madrid, España.

Van Tittelboom, K., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W., 2010. Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cem. Concr. Res.* 40, 157–166. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025>

Villoria Saez, P., Del Río Merino, M., San-Antonio González, A., Porrás-Amores, C., 2013. Best practice measures assessment for construction and demolition waste management in building constructions. *Resour. Conserv. Recycl.* 75, 52–62. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.03.009>

Zhang, H., Zhao, Y., 2014. Performance of recycled aggregate concrete in a real project. *Adv. Struct. Eng.* 17, 895–906. <https://doi.org/10.1260/1369-4332.17.6.895>

Zhu, J., Wu, S., Zhong, J., Wang, D., 2012. Investigation of asphalt mixture containing demolition waste obtained from earthquake-damaged buildings. *Constr. Build. Mater.* 29, 466–475. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.023>





# Objetivos

# O**bj**etivos

---

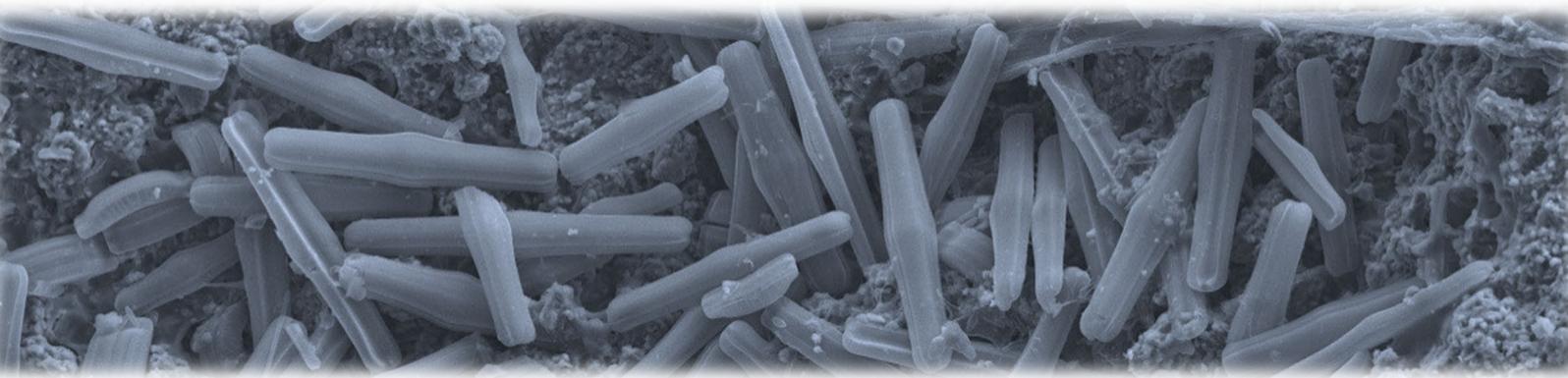
El objetivo general de esta tesis es mejorar las propiedades de durabilidad de los hormigones elaborados con áridos reciclados promoviendo su uso para impulsar una economía circular y la valorización integral de los residuos de construcción y demolición (RCDs), el cual se podría enunciar como una doble vertiente:

- I. Estudiar la viabilidad de utilizar biodeposiciones de caparzones celulares de diatomeas como recubrimiento, cuyo efecto de cobertura pudiese proporcionar propiedades sellantes y reparadoras en este tipo de materiales base-cemento, con la aspiración de reducir la dependencia de materias primas convencionales en operaciones de reparación o mantenimiento en estructuras de hormigón.
- II. Lograr que estas deposiciones naturales sirvan como un biomaterial protector que evite el uso de polímeros artificiales, contribuyendo así a mitigar los efectos perjudiciales para el medio ambiente asociados a estas sustancias.

Este enfoque busca consolidar los principios de la sostenibilidad en la construcción y fortalecer la aplicación de prácticas más ecológicas en la ingeniería civil.

Para el cumplimiento del objetivo general, la investigación se centra en los siguientes aspectos:

- ❖ Investigar y caracterizar detalladamente la formación de la biopelícula originada por las diatomeas en la superficie de los hormigones reciclados, a través del análisis físico, químico y biológico, para comprender su estructura y propiedades.
- ❖ Optimizar las condiciones de crecimiento de las diatomeas para mejorar la eficiencia de la biodeposición de sílice biogénica en hormigones con áridos reciclados, explorando factores que puedan afectar a la concentración de diatomeas, como la temperatura, fotoperiodo y nutrientes, para maximizar la deposición de sílice biogénica.
- ❖ Evaluar el impacto de la biodeposición de sílice biogénica en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón, comparando las propiedades protectoras que aporta la biopelícula con respecto a las muestras no tratadas.





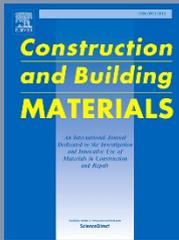
# Capítulo 1

## **Innovative approach for the protection of recycled concrete by biogenic silica biodeposition**

Daniel Merino-Maldonado, Andrea Antolín-Rodríguez, Lorena Serrano-González, Saúl Blanco, Andrés Juan-Valdés, Julia M<sup>a</sup> Morán-del Pozo, Julia García-González

Construction and Building Materials 368 (2023) 130475

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130475>



## Innovative approach for the protection of recycled concrete by biogenic silica biodeposition



Daniel Merino-Maldonado, Andrea Antolín-Rodríguez, Lorena Serrano-González, Saúl Blanco, Andrés Juan-Valdés, Julia M<sup>a</sup> Morán-del Pozo, Julia García-González

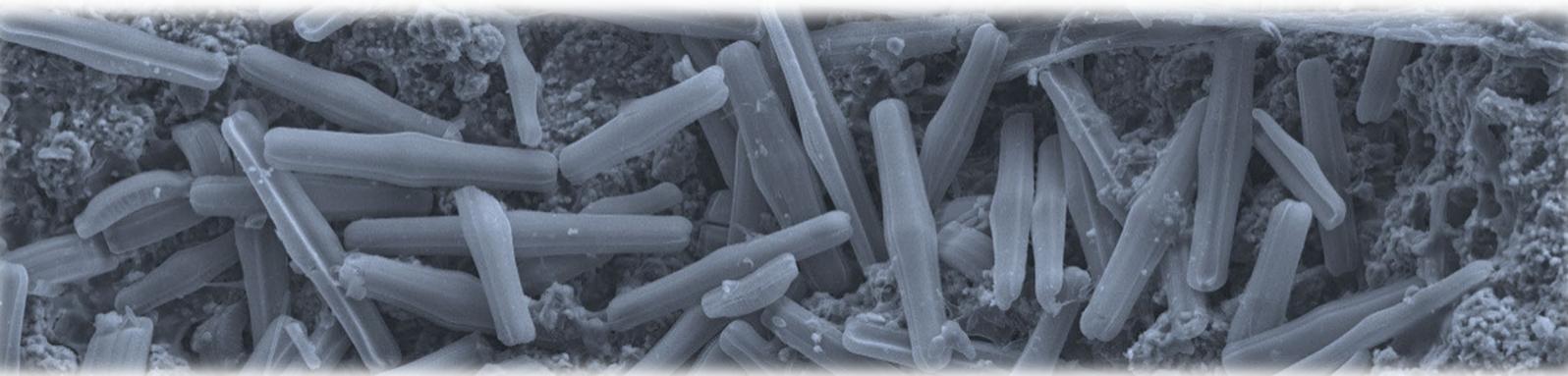
Construction and Building Materials 368 (2023) 130475

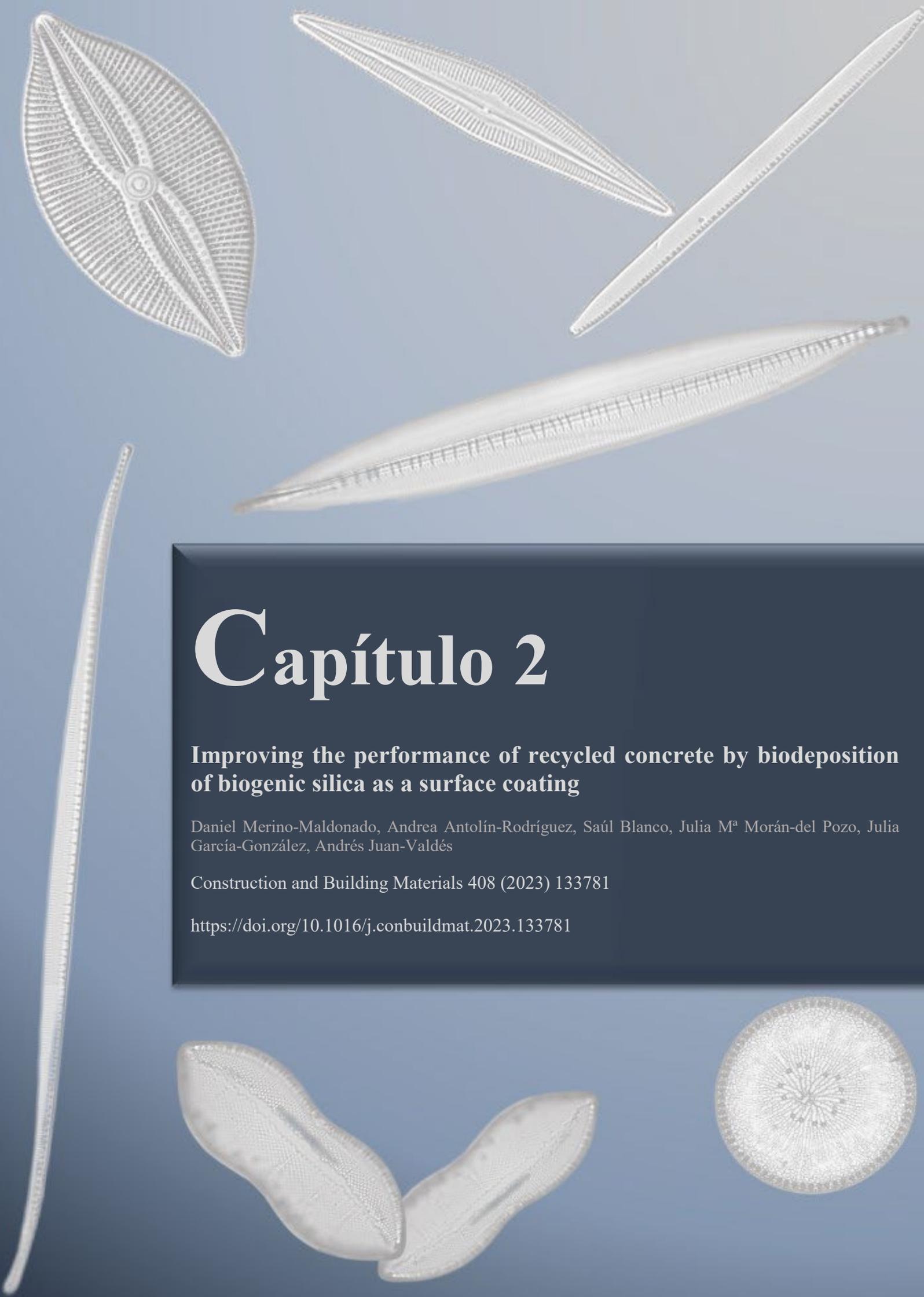
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130475>

## Resumen

En los últimos años, la industria de la construcción ha tratado de ser más sostenible mediante el uso de materiales más responsables desde el punto de vista económico y la utilización de técnicas respetuosas con el medio ambiente, como la bioreparación. Un campo prometedor en este sentido es el de los tratamientos superficiales, en particular las técnicas de bioreparación, para reducir el deterioro que sufren los materiales a base de cemento como consecuencia de las condiciones ambientales. Este estudio presenta un trabajo original sobre el uso de la biodeposición de silicatos por diatomeas como tratamiento superficial impermeabilizante del hormigón reciclado. Se utilizó como sustrato de ensayo una mezcla de hormigón reciclado con una sustitución del 50% de áridos reciclados (AR) y se evaluó la eficacia del biotratamiento mediante cuatro ensayos diferentes: absorción capilar, penetración de agua a alta presión, absorción de agua a baja presión y también se caracterizó la capa biodepositada mediante SEM. Los resultados demuestran reducciones de hasta el 33% en la prueba de absorción capilar, mientras que la penetración de agua a alta presión disminuyó un 54,7%, en comparación con los controles. Además, las pruebas de tubos Karsten mostraron que la absorción de agua a baja presión se retrasaba hasta 436 veces en relación con las muestras de control. En conjunto, estas pruebas confirman la eficacia de la biodeposición de diatomeas como tratamiento protector de superficies para materiales de construcción a base de cemento.

**Palabras clave:** diatomeas; tratamiento superficial; biodeposición; sílice biogénica; residuos de construcción y demolición (RCD); hormigón reciclado; durabilidad.





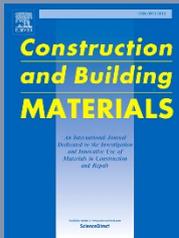
# Capítulo 2

## **Improving the performance of recycled concrete by biodeposition of biogenic silica as a surface coating**

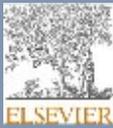
Daniel Merino-Maldonado, Andrea Antolín-Rodríguez, Saúl Blanco, Julia M<sup>a</sup> Morán-del Pozo, Julia García-González, Andrés Juan-Valdés

Construction and Building Materials 408 (2023) 133781

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133781>



## Improving the performance of recycled concrete by biodeposition of biogenic silica as a surface coating



Daniel Merino-Maldonado, Andrea Antolín-Rodríguez, Saúl Blanco, Julia M<sup>a</sup> Morán-del Pozo, Julia García-González, Andrés Juan-Valdés

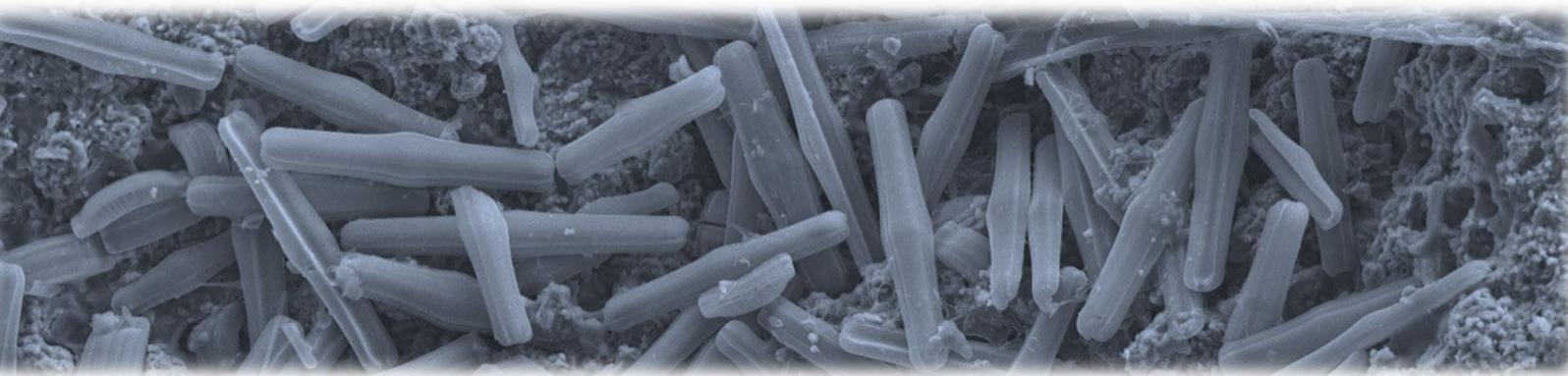
Construction and Building Materials 408 (2023) 133781

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133781>

## Resumen

Este estudio aborda los retos de la sostenibilidad y la aplicación de una economía circular en la construcción y el mantenimiento de estructuras de hormigón utilizadas en aplicaciones de aguas limpias. En concreto, examina el uso de un tratamiento superficial innovador basado en una biopelícula que comprende la deposición de biosílice de diatomeas como agente impermeabilizante y sellador de poros superficiales para mejorar la longevidad del hormigón reciclado. Para ello, se sometieron muestras tratadas con biopelícula y no tratadas (control) de una mezcla de hormigón que contenía un 50% de áridos reciclados a cuatro pruebas de rendimiento dirigidas a evaluar la durabilidad de las estructuras de hormigón en condiciones ambientales: resistencia a la carbonatación, durabilidad a la congelación-descongelación, resistencia a la penetración de agua y resistividad eléctrica como indicador de la resistencia a la corrosión del hormigón. Además, se caracterizó la biopelícula protectora mediante SEM. Los resultados sugieren que el tratamiento superficial con sílice biogénica mejora significativamente la durabilidad del hormigón reciclado, en particular, para las muestras tratadas en comparación con las no tratadas hubo una reducción del 56% del frente de carbonatación, un 26% menos de pérdida de masa en ciclos de congelación-descongelación, una reducción del 57% en el frente de penetración de agua bajo presión, y un 44% más de resistividad eléctrica. En conjunto, estos resultados confirman que la biopelícula utilizada en este estudio constituye un tratamiento eficaz para mejorar las propiedades del hormigón reciclado y garantizar su durabilidad, especialmente cuando se utiliza en la construcción de estructuras en contacto con constantes fluctuaciones de agua.

**Palabras clave:** tratamiento superficial; durabilidad; biodeposición; diatomeas; sílice biogénica; residuos de construcción y demolición (RCD); hormigón reciclado.





# Capítulo 3

## Surface protection of recycled concrete from different biogenic silica bio-deposition techniques: A sustainable approach

Daniel Merino-Maldonado, Andrea Antolín-Rodríguez, Saúl Blanco, Julia M<sup>a</sup> Morán-del Pozo, Julia García-González, Andrés Juan-Valdés

Journal of Building Engineering 84 (2024) 108622

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108622>



## Surface protection of recycled concrete from different biogenic silica bio-deposition techniques: A sustainable approach

Daniel Merino-Maldonado, Andrea Antolín-Rodríguez, Saúl Blanco, Julia M<sup>a</sup> Morán-del Pozo, Julia García-González, Andrés Juan-Valdés



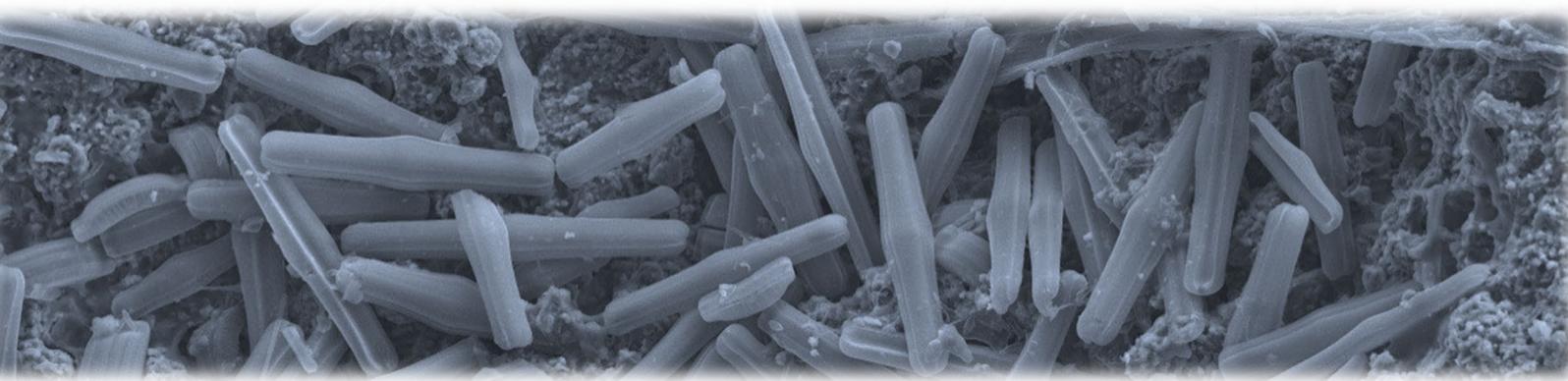
Journal of Building Engineering 84 (2024) 108622

<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108622>

## Resumen

La creciente generación de residuos de construcción y demolición plantea un reto medioambiental. En este estudio se propone el uso de hormigones reciclados como posible solución, reduciendo la extracción de recursos naturales y minimizando la acumulación de residuos en vertederos. Para asegurar la durabilidad y resistencia de este tipo de hormigones reciclados, se desarrollaron dos técnicas de cultivo de diatomeas en ambientes controlados para promover la bio-deposición de sílice biogénica en la superficie del hormigón. A través de la biopelícula protectora resultante, las diatomeas disminuyeron la absorción capilar y mejoraron la impermeabilidad del hormigón al agua y a los gases, como el CO<sub>2</sub>. Además, contribuyeron a aumentar la resistencia mecánica del hormigón y a modificar positivamente la morfología de su superficie al densificar y sellar los poros superficiales. Estos resultados respaldan el potencial de las diatomeas como solución eficaz para mejorar las propiedades y la durabilidad del hormigón reciclado.

**Palabras clave:** tratamiento superficial; bio-deposición; durabilidad; sílice biogénica; hormigón reciclado.





# Discusión

# Discusión

---

La presente tesis pretende, a través de las investigaciones realizadas, mostrar la novedad y propiedades de la aplicación de diatomeas como fuente natural para la obtención de recubrimientos protectores de materiales de base cemento.

Hasta la fecha, a pesar de la probada eficacia de los tratamientos superficiales a base de sílice en la protección del hormigón, el potencial de las diatomeas como fuente natural para estos recubrimientos ha sido en gran medida inexplorado en la literatura científica. La principal innovación de este estudio reside en el hecho de que este trabajo representa, hasta la fecha, la primera aplicación de diatomeas en la industria de la construcción como recubrimiento protector de hormigón elaborado con áridos reciclados.

La biodeposición planteada implica la generación (espontánea o forzada) de los cuerpos celulares de las diatomeas (también denominados frústulas) los cuales están compuestos de sílice. Estos cuerpos celulares se acumulan conforme la colonia de diatomeas crece, formando capas de sílice biológica con sus propios componentes celulares que se adhieren a la superficie del material tratado, donde se depositan en capas que no alteran reactivamente los productos de hidratación del cemento ni el propio hormigón.

Es más, con el avance de esta investigación se ha conseguido la optimización del desarrollo de poblaciones de diatomeas y, con ello, la biodeposición de sílice biogénica (Merino-Maldonado et al., 2024). Esto se ha logrado mediante el cultivo controlado de estas diatomeas en entornos artificiales con condiciones ambientales y de alimentación rigurosamente controladas (Merino-Maldonado et al., 2024). A diferencia de investigaciones previas (Merino-Maldonado et al., 2023a) (Merino-Maldonado et al., 2023b), esta metodología no limita el desarrollo de las diatomeas a períodos específicos con condiciones ambientales más favorables o fotoperiodos positivos. Además, la capacidad de cultivar diatomeas permite establecer plazos flexibles para un desarrollo prolongado de colonias, lo que se traduce en una mayor deposición de sílice biogénica a

lo largo del tiempo. Estas mejoras garantizan un enfoque más eficiente y controlado para aprovechar de forma óptima los beneficios de la bio-deposición de diatomeas.

La comparación de este enfoque con otros tratamientos, como puede ser el nanosílice sintetizado en laboratorio o la biodeposición de  $\text{CaCO}_3$  bacteriano, pone de manifiesto la singularidad del método propuesto en esta tesis. Los resultados obtenidos a través de tres técnicas distintas de biodeposición, incluyendo la deposición natural en un estanque artificial (Merino-Maldonado et al., 2023a) (Merino-Maldonado et al., 2023b), cultivo interior y cultivo exterior (Merino-Maldonado et al., 2024), muestran resultados notables como elemento protector. Este proceso biológico genera un sellado superficial de los poros en la capa exterior del hormigón, a través una capa más densa que protege el hormigón y produce además un incremento de la resistencia mecánica en todos los métodos. Esta mayor resistencia a la compresión está vinculada a una mayor densidad del hormigón (Bolborea et al., 2021), sugiriendo que la biopelícula de diatomeas puede producir la densificación de las superficies de hormigón, reforzando así su microestructura. Este aumento en la resistencia a la compresión también fue observado en otros estudios, Hou et al. (2014) o Javid et al. (2019) con la aplicación de nanosílice coloidal sobre la superficie del hormigón.

De igual forma con respecto a trabajos sobre otros tratamientos biológicos, los resultados obtenidos con la utilización de diatomeas, también son comparables. Por ejemplo, en la revisión de Parashar y Nagar (Parashar and Nagar, 2023) sobre tratamientos superficiales basados en la biodeposición de bacterias de la familia *Bacillus*, se documentan aumentos significativos en la resistencia a compresión de muestras de hormigón protegidas por biodeposición bacteriana de  $\text{CaCO}_3$ . Los mismos autores también discuten cómo se ha observado que las biopelículas sellan los poros superficiales del hormigón, aumentando así la densidad de su matriz superficial; estos efectos, concluyen, conducen a aumentos en la resistencia a la compresión, por lo que se puede afirmar que este mismo efecto es el ocurrido a través de la sílice biogénica de las diatomeas.

Además del incremento de resistencia mecánica, la biopelícula de sílice biogénica demuestra un doble efecto impermeabilizante y sellante, al reducir la penetración de agua y  $\text{CO}_2$  en el hormigón y producir un efecto de reducción de la absorción capilar o un aumento de resistencia a los ciclos de hielo-deshielo protegiendo superficialmente las

muestras estudiadas. Estos resultados se comparan favorablemente con otros trabajos de impermeabilización del hormigón. Por ejemplo, Li et al. (2021) con la utilización de nanosílice a un 12,5% y un tamaño de partícula de 10 nm, consiguieron reducir la entrada del agua e incrementar la resistencia del hormigón a ciclos de congelación. Del mismo modo, Sakr et al. (2021), que utilizaron nanosílice coloidal de 50 nm como tratamiento de superficie en varias concentraciones (5%, 10%, 15%, 25% y 50% en masa) lograron impermeabilizar la superficie del hormigón por el efecto de sellado de poros conferido por el nanomaterial, o Fajardo et al. (Fajardo et al., 2015), los cuales observaron una disminución en la profundidad de carbonatación tras la aplicación de nanosílice obtenido por el método sol-gel y con un tamaño de partícula inferior a 30 nm en materiales cementosos endurecidos, debido al bloqueo de los poros superficiales.

Más en línea biológica con la investigación presentada en esta tesis, De Muynck et al. (2008), investigaron la biodeposición de carbonatos producidos por la bacteria *B. Sphaericus* LMG ( $10^7$  células/mL). Las bacterias provocaron mejoras en la resistencia al agua y reducción de la entrada de gases como el CO<sub>2</sub>. Corroborando este efecto, Salmasi y Mostofinejad (2020), utilizando la bacteria *Bacillus subtilis* (PTCC 1254; NCIM 2479; NCIB 8646; ATCC12711) a la misma concentración que en el estudio de Muynck et al. (2008) obtuvieron una reducción de la entrada de dióxido de carbono, gracias al efecto impermeabilizante conferido por la biodeposición. De la misma forma, el estudio de Cappellessso et al. (2023) demostró una protección a los ciclos de congelación-descongelación, gracias al efecto curativo del CaCO<sub>3</sub> producido por la bacteria *Bacillus cohnii*. Aunque en este caso las biopelículas de diatomeas utilizadas no proporcionan el mismo grado de protección, los resultados sugieren que las condiciones de biodeposición podrían adaptarse para aumentar la concentración de diatomeas y, de este modo, incrementar la resistencia al agua de las películas depositadas. Estos resultados ponen de manifiesto la capacidad de las diatomeas y otros tratamientos superficiales para mejorar la durabilidad del hormigón y protegerlo frente a las adversidades medioambientales.

En su conjunto, estas comparaciones no solo contextualizan los resultados de este estudio, sino que también enfatizan la innovación única que aporta la biodeposición de diatomeas a la mejora de propiedades del hormigón reciclado, destacando su singularidad. Por ello se enfoca la discusión especialmente en comparar la biodeposición de diatomeas con otro tratamiento biológico que involucra la deposición de CaCO<sub>3</sub> mediante bacterias,

resaltando su eficacia y simplicidad en la formación de la biopelícula protectora que ofrecen las diatomeas, a diferencia del proporcionado por las bacterias, el cual es más minucioso (De Muynck et al., 2008).

Además de su comparación con otro tratamiento sintético a base de sílice, en forma de nanosílice, dada la proximidad en la composición química de este nanocompuesto con la sílice biogénica, haciendo que el cultivo de diatomeas resulte aún más atractivo como opción sostenible y eficaz para mejorar la durabilidad del hormigón, a pesar de que la biocapa no se distribuye homogéneamente sobre la superficie en contraste con el nanosílice sintético, como demostraron en el estudio de Ardalan et al. (2017), ya que al tratarse de una aplicación directa puede distribuirse por toda la superficie, subrayando la viabilidad de la biodeposición de diatomeas como una alternativa más ecológica respecto a este tipo de tratamientos sintéticos.

Las pruebas presentadas en esta tesis respaldan la perspectiva de la sílice biogénica como un tratamiento efectivo para potenciar la durabilidad y resistencia del hormigón. A pesar de estos beneficios, es evidente la escasez de investigaciones en torno a la sílice biogénica como método protector. Por ello, se requiere una mayor investigación, abarcando desde una caracterización más detallada, tanto física como química del biofilm, hasta una mejor optimización para conseguir una mayor densidad de las especies que mejor interactúan con el hormigón. Además, se precisa explorar la viabilidad práctica de este tratamiento superficial.

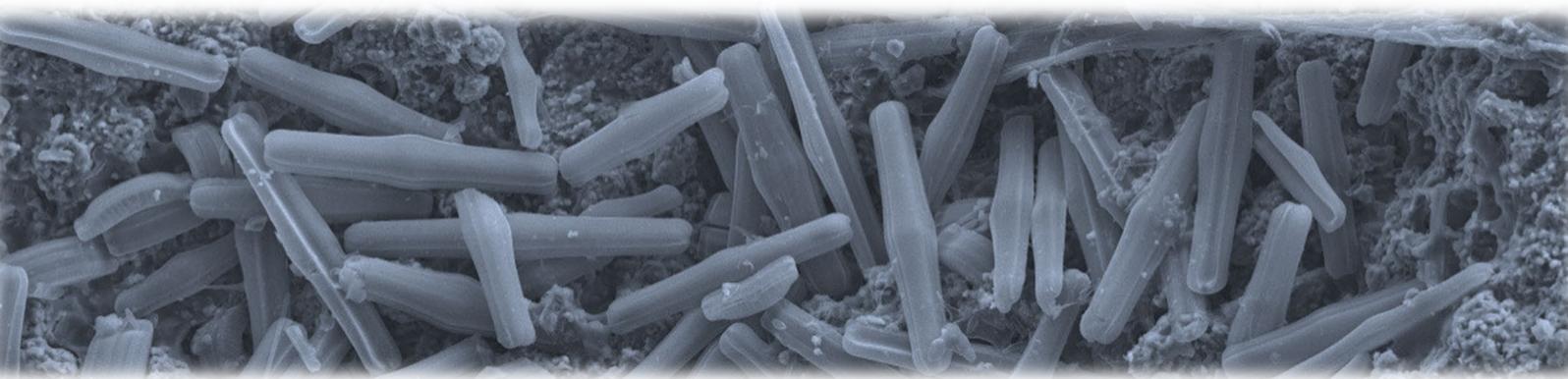
En este sentido, se puede extraer de los datos analizados que la deposición de diatomeas en estructuras existentes sin contacto con agua puede ser inviable o extremadamente complicada, debido a las condiciones de supervivencia de las mismas, al tratarse de organismos acuáticos. No obstante, su utilidad primordial se puede manifestar en estructuras hidráulicas que estén en contacto permanente o que experimenten fluctuaciones en los niveles de aguas limpias. Aquí, las condiciones propicias para el desarrollo de diatomeas podrían permitir una biodeposición efectiva en las superficies de estas estructuras. Además, se podría considerar su aplicación en estructuras prefabricadas bajo condiciones controladas, lo que puede ser una alternativa viable, pudiendo facilitar la biodeposición en ambientes más regulados e integrarse prácticamente en proyectos de construcción donde la prefabricación sea una opción.

Estos enfoques abrirían la posibilidad para desarrollar mejor la biodeposición de diatomeas en ambientes regulados, presentando una aplicación práctica significativa en el campo de la construcción e ingeniería civil, al lograr estructuras más duraderas y resistentes con el uso de hormigones que incorporan áridos reciclados, donde se fomentaría la reducción del consumo de materias primas, promoviendo así una economía más circular en la industria de la construcción.

## Referencias

- Ardalan, R.B., Jamshidi, N., Arabameri, H., Joshaghani, A., Mehrinejad, M., Sharafi, P., 2017. Enhancing the permeability and abrasion resistance of concrete using colloidal nano-SiO<sub>2</sub> oxide and spraying nanosilicon practices. *Constr. Build. Mater.* 146, 128–135. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.078>
- Bolborea, B., Baera, C., Dan, S., Gruin, A., Burduhos-Nergis, D.D., Vasile, V., 2021. Concrete compressive strength by means of ultrasonic pulse velocity and moduli of elasticity. *Materials (Basel)*. 14, 1–16. <https://doi.org/10.3390/ma14227018>
- Cappelleso, V.G., Van Mullem, T., Gruyaert, E., Van Tittelboom, K., De Belie, N., 2023. Bacteria-based self-healing concrete exposed to frost salt scaling. *Cem. Concr. Compos.* 139, 105016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.105016>
- De Muynck, W., Debrouwer, D., De Belie, N., Verstraete, W., 2008. Bacterial carbonate precipitation improves the durability of cementitious materials. *Cem. Concr. Res.* 38, 1005–1014. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.005>
- Fajardo, G., Cruz-López, A., Cruz-Moreno, D., Valdez, P., Torres, G., Zanella, R., 2015. Innovative application of silicon nanoparticles (SN): Improvement of the barrier effect in hardened Portland cement-based materials. *Constr. Build. Mater.* 76, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.054>
- Hou, P., Cheng, X., Qian, J., Shah, S.P., 2014. Effects and mechanisms of surface treatment of hardened cement-based materials with colloidal nanoSiO<sub>2</sub> and its precursor. *Constr. Build. Mater.* 53, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.062>

- Li, L., Xuan, D., Chu, S.H., Lu, J.X., Poon, C.S., 2021. Efficiency and mechanism of nano-silica pre-spraying treatment in performance enhancement of recycled aggregate concrete. *Constr. Build. Mater.* 301, 124093. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124093>
- Merino-Maldonado, D., Antolín-Rodríguez, A., Blanco, S., Morán-del Pozo, J.M., García-González, J., Juan-Valdés, A., 2024. Surface protection of recycled concrete from different biogenic silica bio-deposition techniques: A sustainable approach. *J. Build. Eng.* 84. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108622>
- Merino-Maldonado, D., Antolín-Rodríguez, A., Blanco, S., Morán-del Pozo, M.J., García-González, J., Juan-Valdés, A., 2023a. Improving the performance of recycled concrete by biodeposition of biogenic silica as a surface coating. *Constr. Build. Mater.* 408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133781>
- Merino-Maldonado, D., Antolín-Rodríguez, A., Serrano-González, L., Blanco, S., Juan-Valdés, A., Morán-del Pozo, J.M., García-González, J., 2023b. Innovative approach for the protection of recycled concrete by biogenic silica biodeposition. *Constr. Build. Mater.* 368, 130475. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130475>
- Parashar, A.K., Nagar, P., 2023. Effect of Bacillus Family Bacteria on the Mechanical and Durability Properties of Concrete Mix: A Review, in: *Engineering*, L.N. in M. (Ed.), Shukla, A.K., Sharma, B.P., Arabkoohsar, A., Kumar, P. (Eds) *Recent Advances in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore, pp. 521–530. <https://doi.org/10.1007/978-981-99-1894-2>
- Sakr, M.R., Bassuoni, M.T., Ghazy, A., 2021. Durability of concrete superficially treated with nano-silica and silane/ nano-clay coatings. *Transp. Res. Rec.* 2675, 21–31. <https://doi.org/10.1177/0361198120953160>
- Salmasi, F., Mostofinejad, D., 2020. Investigating the effects of bacterial activity on compressive strength and durability of natural lightweight aggregate concrete reinforced with steel fibers. *Constr. Build. Mater.* 251, 119032. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119032>
- Shirzadi Javid, A.A., Ghoddousi, P., Zareechian, M., Habibnejad Korayem, A., 2019. Effects of Spraying Various Nanoparticles at Early Ages on Improving Surface Characteristics of Concrete Pavements. *Int. J. Civ. Eng.* 17, 1455–1468. <https://doi.org/10.1007/s40999-019-00407-4>





# Conclusiones

# Conclusiones

---

## **Prospección del uso de sílice biogénica como tratamiento superficial**

- ❖ El crecimiento de diatomeas es una técnica viable para la producción de sílice biogénica en materiales de base cemento.
- ❖ El análisis microscópico por energía dispersiva EDX demuestra que la biopelícula formada por el desarrollo de las colonias tiene una composición predominantemente de naturaleza silíceo en forma de SiO<sub>2</sub>.
- ❖ Las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido revelaron que las frústulas de diatomeas llenaron los poros y tapizaron la superficie del hormigón de manera heterogénea.

## **Optimización del desarrollo de la sílice biogénica**

- ❖ Se determina un período óptimo de tres meses para lograr una cantidad adecuada de sílice biogénica en la formación de una biopelícula compuesta por capas superpuestas de diatomeas para la protección del hormigón endurecido.
- ❖ La optimización de la biopelícula generada mediante la biodeposición de diatomeas puede lograrse mediante el control riguroso de alimentación y parámetros ambientales, como el fotoperiodo y la temperatura.

## **Efectos de la sílice biogénica como recubrimiento en hormigones reciclados**

- ❖ La biodeposición de sílice aumenta la resistencia mecánica del hormigón reciclado, debido a la formación de una biocapa más densa sobre la matriz superficial del hormigón.
- ❖ La biodeposición de sílice procedente de las diatomeas es un tratamiento superficial eficaz para mejorar las propiedades de durabilidad del hormigón con áridos reciclados, de tal forma que:

- ❖ Demuestra su efecto impermeabilizante y sellante con la presencia de diatomeas al reducir la penetración de agua y gases como el CO<sub>2</sub>.
- ❖ Produce un efecto de reducción de la absorción capilar, a través del bloqueo y sellado de poros de la matriz superficial del hormigón.
- ❖ Incrementa la resistencia del hormigón a ciclos congelación-descongelación, evitando pérdida de masa, de tal forma que lo protege superficialmente de fenómenos extremos.
- ❖ Incrementa la resistencia a la resistividad eléctrica, lo cual podría proporcionar una protección contra la corrosión en hormigones armados.

# Conclusions

---

## **Prospecting the use of biogenic silica as a surface treatment**

- ❖ Diatom growth is a viable technique for the production of biogenic silica on cement-based materials.
- ❖ Microscopic analysis by energy dispersive EDX shows that the biofilm formed by the development of the colonies has a composition predominantly of a siliceous nature in the form of SiO<sub>2</sub>.
- ❖ Scanning electron microscopy micrographs revealed that diatom frustules filled the pores and heterogeneously covered the surface of the concrete.

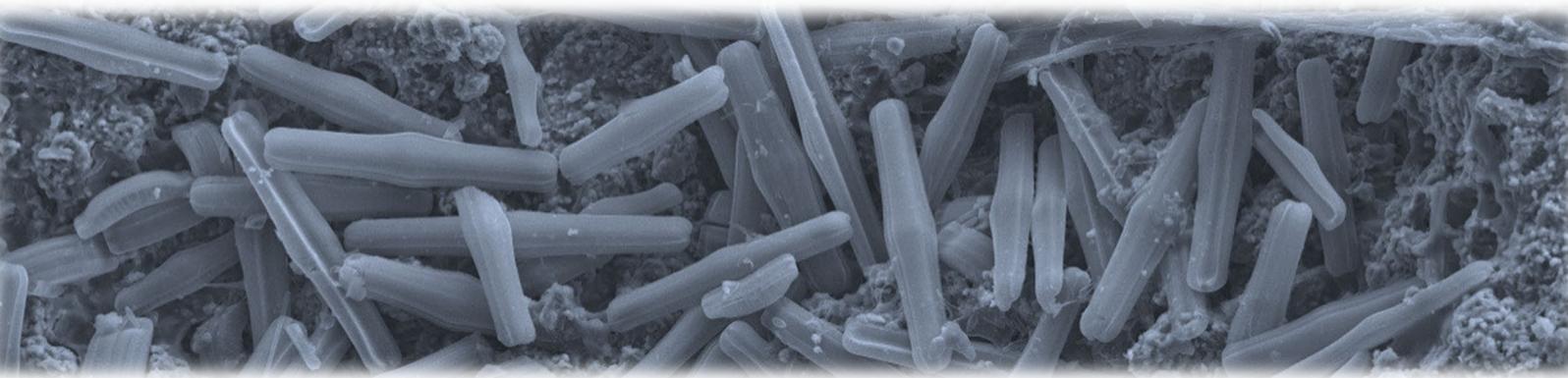
## **Optimisation of biogenic silica development**

- ❖ An optimal period of three months is determined to achieve an adequate amount of biogenic silica in the formation of a biofilm composed of overlapping layers of diatoms for the protection of hardened concrete.
- ❖ Optimisation of the biofilm generated by diatom biodeposition can be achieved by tight control of feed and environmental parameters such as photoperiod and temperature.

## **Effects of biogenic silica as a coating on recycled concretes**

- ❖ Silica biodeposition increases the mechanical strength of recycled concrete due to the formation of a denser biolayer on the surface matrix of the concrete.
- ❖ Silica biodeposition from diatoms is an effective surface treatment to improve the durability properties of concrete with recycled aggregates, such that:
  - ❖ Demonstrates its waterproofing and sealing effect with the presence of diatoms by reducing the penetration of water and gases such as CO<sub>2</sub>.

- ❖ Produces a capillary absorption reduction effect by blocking and sealing pores in the surface matrix of the concrete.
- ❖ Increases the resistance of the concrete to freeze-thaw cycles, preventing mass loss, thus protecting it superficially from extreme phenomena.
- ❖ Increases resistance to electrical resistivity, which could provide protection against corrosion in reinforced concrete.





universidad  
de león