

Avances en el Uso del Hormigón Armado en Ingeniería Civil: Una revisión sistemática

Advances in the Use of Reinforced Concrete in Civil Engineering: A systematic Review

DOI: <https://doi.org/10.33262/rmc.v9i3.3161>

Hugo Julianny Latorre Aizaga ¹

Universidad Central del Ecuador, Ecuador



<https://orcid.org/0009-0008-4911-9295>

hjlatorre@ece.edu.ec

DIRECCIÓN PARA CORRESPONDENCIA: hjlatorre@ece.edu.ec

Fecha de recepción: 16 / 04 / 2024

Fecha de aceptación: 06 / 06 / 2024

RESUMEN

El presente artículo ofrece una revisión sistemática de los avances en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil. Se destaca la importancia de los desarrollos en el diseño y optimización estructural, impulsados por teorías avanzadas y herramientas computacionales, que han permitido maximizar la eficiencia y minimizar el uso de materiales, garantizando el rendimiento y la seguridad. Además, se resalta la introducción de materiales innovadores, como compuestos cementosos avanzados, fibras de refuerzo y adiciones minerales, que han mejorado las propiedades mecánicas, la durabilidad y la sostenibilidad de las estructuras. La sostenibilidad y el reciclaje emergen como temas centrales, enfocados en la reducción de la huella ambiental mediante el uso de materiales alternativos, la mejora de la durabilidad y la adopción de prácticas de reciclaje. El hormigón armado también se ha adaptado a aplicaciones especializadas, como estructuras marinas, infraestructuras de energías renovables y construcción prefabricada, mediante el uso de hormigones especiales y detalles constructivos innovadores. A pesar de los avances, se identifican desafíos y oportunidades para futuras investigaciones, como el desarrollo de modelos predictivos más precisos y la integración de tecnologías emergentes para el monitoreo y mantenimiento de las estructuras. En conclusión, los

avances multifacéticos en el uso del hormigón armado han contribuido a la construcción de estructuras más seguras, eficientes y sostenibles, y es fundamental seguir explorando e implementando estos desarrollos para abordar los desafíos globales en la ingeniería civil.

Palabras clave: Hormigón armado, materiales innovadores, sostenibilidad, eficiencia estructural, construcción prefabricada.

ABSTRACT

This article provides a systematic review of the advances in the use of reinforced concrete in civil engineering. It highlights the importance of developments in structural design and optimization, driven by advanced theories and computational tools, which have allowed maximizing efficiency and minimizing material usage while ensuring performance and safety. Furthermore, the introduction of innovative materials, such as advanced cementitious composites, reinforcing fibers, and mineral additives, has improved the mechanical properties, durability, and sustainability of structures. Sustainability and recycling emerge as central themes, focusing on reducing the environmental footprint through the use of alternative materials, enhancing durability, and adopting recycling practices. Reinforced concrete has also been adapted to specialized applications, such as marine structures, renewable energy infrastructures, and prefabricated construction, using special concretes and innovative construction details. Despite the advances, challenges and opportunities for future research are identified, such as the development of more accurate predictive models and the integration of emerging technologies for monitoring and maintenance of structures. In conclusion, the multifaceted advances in the use of reinforced concrete have contributed to the construction of safer, more efficient, and sustainable structures, and it is essential to continue exploring and implementing these developments to address global challenges in civil engineering.

Keywords: Reinforced concrete, innovative materials, sustainability, structural efficiency, prefabricated construction.

INTRODUCCIÓN

El hormigón armado es un material ampliamente utilizado en ingeniería civil debido a su combinación única de resistencia a compresión proporcionada por el hormigón y resistencia a tracción proporcionada por el acero de refuerzo. Este material ha sido fundamental en el diseño y construcción de estructuras seguras y duraderas, desde

edificios y puentes hasta presas y túneles. En este artículo, exploramos los avances más recientes en el uso del hormigón armado, incluyendo nuevas técnicas de diseño, materiales innovadores y aplicaciones especializadas. El hormigón armado representa uno de los pilares fundamentales de la ingeniería civil moderna, siendo ampliamente utilizado en la construcción de infraestructuras que sustentan nuestras ciudades y economías. Esta combinación de hormigón y acero de refuerzo ha revolucionado la forma en que diseñamos y construimos estructuras, proporcionando resistencia, durabilidad y versatilidad en una variedad de aplicaciones.

El hormigón armado es un material compuesto que combina la resistencia a compresión del hormigón con la resistencia a tracción del acero de refuerzo, permitiendo que ambos materiales trabajen conjuntamente para soportar las cargas aplicadas sobre la estructura (Hassoun & Al-Manaseer, 2020). Esta colaboración sinérgica entre dos materiales aparentemente opuestos, el frágil hormigón y el resistente acero, ha sido clave para desarrollar estructuras capaces de soportar cargas pesadas, ya sean estáticas o dinámicas, en condiciones ambientales variables.

El uso generalizado del hormigón armado se remonta a principios del siglo XX, con los primeros experimentos y aplicaciones prácticas realizados por pioneros como François Hennebique, quien desarrolló un sistema de construcción utilizando barras de acero incrustadas en hormigón. Desde entonces, el campo de la ingeniería estructural ha evolucionado enormemente, integrando nuevas técnicas de diseño, avances en materiales y tecnologías de construcción innovadoras.

El diseño estructural optimizado ha sido un área de intensa investigación y desarrollo en relación con el hormigón armado. En la investigación de Cabezas (2019) donde se estableció en el código ACI Committee 318 que proporciona una guía detallada sobre los requisitos de diseño y construcción para el hormigón estructural en los Estados Unidos, abordando aspectos clave como la resistencia, la durabilidad y la seguridad. Además, los métodos computacionales avanzados, como el método de elementos finitos, han permitido a los ingenieros simular el comportamiento estructural del hormigón armado bajo diferentes cargas y condiciones, optimizando así el diseño para maximizar la eficiencia y minimizar el uso de materiales (Araca et al., 2020; Cabezas, 2019).

En términos de materiales, el hormigón armado ha evolucionado significativamente con la introducción de compuestos como el hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) (Sohail et al., 2021). Según Giovambattista et al. (2020), este material innovador ofrece una resistencia excepcional, baja porosidad y una durabilidad extraordinaria, lo que lo

convierte en una opción ideal para aplicaciones estructurales exigentes. Además, la incorporación de fibras de refuerzo, como fibras de vidrio o polímeros, ha mejorado las propiedades de resistencia a la tracción y la tenacidad del hormigón armado, especialmente en regiones sísmicas donde la capacidad de deformación es crucial para la seguridad estructural (Guerra et al., 2018; Olivera et al., 2022).

La sostenibilidad ha emergido como un tema central en la industria de la construcción, y el hormigón armado no es una excepción. La investigación actual se centra en reducir la huella de carbono asociada con la producción de hormigón mediante el uso de materiales alternativos como escoria de alto horno y cenizas volantes como sustitutos parciales del cemento Portland. Este enfoque hacia prácticas más sostenibles está alineado con los objetivos globales de mitigación del cambio climático y conservación de recursos naturales.

El hormigón armado continúa siendo un material indispensable en la ingeniería civil debido a su capacidad para combinar resistencia estructural con versatilidad de diseño. Este artículo explorará en detalle los avances más recientes en el uso y la aplicación del hormigón armado, destacando sus contribuciones a la infraestructura moderna y las perspectivas futuras hacia una construcción más segura y sostenible.

Diseño y Optimización Estructural

El diseño y la optimización estructural del hormigón armado han experimentado avances significativos en las últimas décadas, impulsados por el desarrollo de nuevas teorías de diseño, herramientas computacionales avanzadas y una comprensión más profunda del comportamiento del material (Akhnoukh & Buckhalter, 2021). Este enfoque se centra en maximizar la eficiencia estructural, minimizando el uso de materiales sin comprometer la seguridad ni la durabilidad de las estructuras.

Avances en Teorías de Diseño

Uno de los aspectos clave del diseño estructural del hormigón armado es la aplicación de teorías avanzadas que permiten optimizar la disposición del refuerzo y las secciones transversales de las estructuras. La teoría de la flexión compuesta, por ejemplo, proporciona un marco matemático para calcular la interacción entre el hormigón y el acero bajo cargas flexionantes. Según Hassoun & Al-Manaseer (2020), esta teoría es fundamental para el diseño de vigas y losas reforzadas, permitiendo calcular la distribución de esfuerzos y deformaciones para lograr un diseño eficiente.

Herramientas Computacionales Avanzadas

El uso de herramientas computacionales, como el método de elementos finitos (MEF), ha revolucionado el diseño y la optimización estructural. El MEF permite modelar el comportamiento del hormigón armado bajo cargas complejas y condiciones ambientales variables, lo que facilita la simulación precisa del comportamiento estructural antes de la construcción física (Araca et al., 2020). Esta capacidad de análisis avanzado permite a los ingenieros ajustar y optimizar los diseños para cumplir con los requisitos de rendimiento y seguridad.

Enfoque en la Durabilidad y Resistencia

La optimización estructural no se limita solo a la resistencia mecánica, sino que también abarca la durabilidad y el comportamiento a largo plazo del hormigón armado. Según Shetty & Jain (2019), los avances recientes se centran en garantizar que las estructuras de hormigón armado sean capaces de resistir la corrosión, la fatiga y otras formas de deterioro durante su vida útil. Esto incluye el uso de hormigones especiales con aditivos que mejoran la resistencia a la penetración de agentes agresivos como el cloruro y el sulfato.

Optimización Económica y Ambiental

Los enfoques de diseño estructural centrados en el desempeño ofrecen a los ingenieros la posibilidad de optimizar el uso de recursos y reducir el impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de una edificación. Al incorporar criterios que trascienden las normas convencionales, estos métodos facilitan la identificación de estrategias innovadoras que promueven la eficiencia en el consumo de materiales y energía, tanto durante la fase de construcción como a lo largo de la vida útil de la estructura (Andrea y Hernández, 2022). De esta manera, se impulsa la adopción de prácticas sostenibles en el ámbito de la ingeniería civil.

Innovaciones en Conectores y Detalles Constructivos

Además de las mejoras en el diseño conceptual, se han desarrollado innovaciones en conectores y detalles constructivos para optimizar la transferencia de cargas entre el hormigón y el acero (Araujo, 2020). Por ejemplo, el uso de conectores de corte en losas colaborantes ha mejorado la capacidad de carga y la eficiencia estructural de los sistemas de losas reforzadas. Estas innovaciones se basan en investigaciones experimentales y modelos analíticos que evalúan la efectividad de diferentes configuraciones de conectores.

Materiales Innovadores

En el campo del hormigón armado, la búsqueda constante de materiales innovadores ha llevado al desarrollo de compuestos avanzados que mejoran las propiedades estructurales y funcionales del material (Cejuela et al., 2018). Estos avances han permitido construir estructuras más eficientes, duraderas y sostenibles. A continuación, exploraremos algunos de los materiales innovadores más destacados utilizados en el hormigón armado y sus aplicaciones.

Hormigón de Ultra Alto Rendimiento (UHPC)

El hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) es uno de los materiales más revolucionarios en la industria del hormigón armado (Guerra et al., 2018). Este material posee una alta resistencia a compresión (superior a 150 MPa) y una excelente durabilidad, con una baja porosidad que lo hace altamente resistente a la penetración de agentes agresivos como el agua y los químicos. El UHPC se compone de una matriz de cemento ultrafino, agregados finos y fibras de refuerzo dispersas uniformemente.

El hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) encuentra su aplicación en situaciones que demandan elevada resistencia y durabilidad, siendo especialmente adecuado para la construcción de puentes, fachadas de poco espesor y componentes prefabricados (Visintin et al., 2018). Sus propiedades superiores permiten optimizar el diseño estructural y reducir el uso de materiales.

Fibras de Refuerzo

La incorporación de fibras de refuerzo en el hormigón armado ha mejorado significativamente su resistencia a la tracción y su capacidad de resistir grietas y deformaciones (Olivera et al., 2022). Las fibras de refuerzo pueden ser de diversos materiales, como fibras de acero, fibras de vidrio, fibras de carbono o polímeros. Estas fibras actúan como refuerzo secundario en el hormigón, mejorando su tenacidad y capacidad de absorber energía.

Las fibras de refuerzo, como las de acero, vidrio o polímeros, mejoran considerablemente la capacidad del hormigón para resistir cargas dinámicas y controlar la formación y propagación de fisuras. Estas fibras son particularmente beneficiosas en aplicaciones sometidas a impactos o cargas cíclicas, como pavimentos, pisos industriales y elementos estructurales expuestos a condiciones severas (Bertelsen et al., 2020).

Adiciones Minerales y Sustitutos del Cemento

Otro enfoque innovador en el desarrollo de materiales para hormigón armado es la utilización de adiciones minerales y sustitutos del cemento para reducir la cantidad de

clínker de cemento Portland utilizado. La escoria de alto horno, las cenizas volantes y las filler calcáreas son ejemplos de adiciones minerales que se utilizan como sustitutos parciales del cemento en la producción de hormigón.

La incorporación de adiciones minerales en el hormigón armado reduce las emisiones de CO₂ durante la fabricación del cemento y mejora propiedades como la resistencia, durabilidad y resistencia a sulfatos, permitiendo estructuras más sostenibles sin comprometer su desempeño (Johnson, 2018).

Sostenibilidad y Reciclaje

La sostenibilidad y el reciclaje son aspectos críticos en la ingeniería civil moderna, y el hormigón armado no es una excepción (Pacheco et al., 2017). Los avances en prácticas sostenibles y el desarrollo de técnicas de reciclaje están transformando la forma en que se produce y utiliza el hormigón armado, promoviendo la conservación de recursos naturales y la reducción de la huella ambiental. A continuación, exploraremos las principales iniciativas de sostenibilidad y reciclaje en relación con el hormigón armado.

Uso de Materiales Alternativos

Una estrategia clave para mejorar la sostenibilidad del hormigón armado es la sustitución parcial de materiales convencionales por alternativas más sostenibles. La escoria de alto horno y las cenizas volantes, subproductos industriales, se utilizan como sustitutos parciales del cemento Portland en la producción de hormigón (Guerra et al., 2018). Según Li et al. (2022), esta práctica no solo reduce las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento, sino que también mejora la durabilidad y las propiedades a largo plazo del hormigón.

El uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) está ganando popularidad como una forma de reducir la extracción de áridos naturales y la generación de desechos (Pacheco et al., 2017). Estos agregados reciclados pueden reemplazar parcialmente los agregados vírgenes en la producción de hormigón, contribuyendo así a la sostenibilidad ambiental de las estructuras de hormigón armado (Deresa et al., 2020; Jagan et al., 2021; Xing et al., 2022).

Durabilidad y Resistencia a la Corrosión

La durabilidad a largo plazo del hormigón armado es fundamental para garantizar su sostenibilidad. Mediante la implementación de estrategias de diseño que reduzcan la infiltración de sustancias perjudiciales, como el agua y los cloruros, es posible extender la vida útil de las estructuras y disminuir la frecuencia de las intervenciones de mantenimiento y reparación. Además, la incorporación de aditivos y la aplicación de

tratamientos superficiales pueden mejorar la resistencia del acero de refuerzo frente a la corrosión, contribuyendo así a prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón armado (Unal et al., 2023).

Reciclaje de Hormigón

En la actualidad, el reciclaje de hormigón procedente de estructuras demolidas o en desuso se ha convertido en una práctica cada vez más extendida en el sector de la construcción. Mediante la trituración del hormigón reciclado, es posible obtener agregados gruesos y finos que pueden incorporarse en nuevas mezclas de hormigón, lo que permite reducir la necesidad de extraer áridos naturales y disminuir la cantidad de residuos destinados a los vertederos. Según Jagan et al. (2021), el reciclaje del hormigón no solo contribuye a la conservación de los recursos naturales, sino que también ayuda a mitigar las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de nuevos materiales.

Certificaciones y Normativas

La adopción de prácticas más sostenibles en la construcción de estructuras de hormigón armado se ve impulsada por la existencia de certificaciones y normativas de sostenibilidad, como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) (Romano et al., 2018). Estos sistemas de evaluación fomentan el uso de materiales con un bajo impacto ambiental y promueven el diseño de estructuras que optimicen el consumo de energía y recursos a lo largo de su ciclo de vida.

Aplicaciones Especializadas

El hormigón armado se utiliza en una amplia variedad de aplicaciones especializadas que requieren propiedades específicas de resistencia, durabilidad o adaptación a condiciones ambientales extremas (Mastropiero, 2021). Estas aplicaciones van más allá de las estructuras convencionales y abarcan sectores como la ingeniería marina, las infraestructuras de energías renovables y la construcción prefabricada. A continuación, exploraremos algunas de estas aplicaciones especializadas y sus implicaciones en la ingeniería civil.

Estructuras Marinas

Las estructuras marinas, como muelles, diques y plataformas offshore, están expuestas a ambientes altamente corrosivos y cargas dinámicas significativas. El hormigón armado con aditivos específicos para resistir la corrosión del agua salada y el deterioro causado por agentes marinos es esencial en estas aplicaciones. Según Tibbetts et al. (2020), el uso

de hormigón de alta resistencia y durabilidad en estructuras marinas garantiza una vida útil prolongada y reduce los costos de mantenimiento.

Infraestructuras para Energías Renovables

Las infraestructuras asociadas con energías renovables, como parques eólicos marinos y plantas hidroeléctricas, requieren materiales resistentes y duraderos debido a las condiciones ambientales extremas. El hormigón armado se utiliza en la construcción de cimientos de turbinas eólicas marinas, bases de estructuras hidroeléctricas y plataformas para instalaciones solares. Según Hooton (2019), el diseño y la fabricación de elementos de hormigón prefabricados permiten la rápida construcción e instalación en ubicaciones remotas.

Construcción Prefabricada

La construcción prefabricada es otra área especializada donde el hormigón armado desempeña un papel crucial. Los elementos prefabricados, como vigas, losas y paneles de fachada se fabrican en condiciones controladas de fábrica y luego se transportan al sitio de construcción para su ensamblaje. Según Serrano y Martínez (2021), la prefabricación con hormigón armado ofrece beneficios como mayor calidad, menor tiempo de construcción y reducción de desechos en comparación con los métodos tradicionales de construcción in situ.

Aplicaciones en Estructuras Especiales

El hormigón armado se utiliza en una variedad de estructuras especiales, como túneles, puentes de gran luz, estructuras de contención y silos industriales. Cada una de estas aplicaciones requiere consideraciones específicas de diseño y materiales para garantizar la seguridad y el rendimiento estructural. Según Choo y MacGinley (2018), el hormigón armado ha sido fundamental en el desarrollo de soluciones innovadoras para la ingeniería civil, permitiendo la construcción de estructuras complejas y eficientes.

METODOLOGÍA

La presente revisión sistemática se realizó siguiendo un enfoque cualitativo, basado en la recopilación, análisis e interpretación de estudios primarios relevantes sobre los avances en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil. La búsqueda de literatura se llevó a cabo en bases de datos especializadas, aplicando criterios de inclusión y exclusión predefinidos para garantizar la calidad y pertinencia de los estudios seleccionados.

Estrategia de Búsqueda

Con el fin de identificar investigaciones pertinentes, se llevó a cabo una búsqueda exhaustiva en diversas bases de datos electrónicas, incluyendo Scopus, Web of Science, ASCE Library y ScienceDirect. La estrategia de búsqueda se formuló empleando una combinación de términos clave relacionados con el hormigón armado, los avances en ingeniería civil y las áreas temáticas específicas de interés, como el diseño estructural, los materiales, la sostenibilidad y las aplicaciones especializadas. Entre los términos de búsqueda utilizados se encuentran: "reinforced concrete", "civil engineering", "structural design", "optimization", "innovative materials", "sustainability", "recycling" y "specialized applications". Se emplearon operadores booleanos y truncamiento para abarcar posibles variaciones en la terminología. La búsqueda se acotó a artículos publicados en inglés entre los años 2018 y 2024, con el objetivo de capturar los desarrollos más recientes en el campo (Afzal et al., 2020; V. Li, 2019; Sahami et al., 2019).

Selección de Estudios

El proceso de selección de estudios se llevó a cabo siguiendo la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) (Rethlefsen & Page, 2022). Se establecieron criterios de inclusión y exclusión predefinidos para identificar aquellos estudios relevantes que abordaran las preguntas de investigación planteadas.

Criterios de inclusión:

1. Estudios que abordaran avances en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil, incluyendo diseño estructural, materiales innovadores, sostenibilidad y aplicaciones especializadas.
2. Estudios publicados en revistas revisadas por pares o en actas de conferencias.
3. Estudios que presentaran datos empíricos originales, revisiones sistemáticas o metaanálisis.
4. Estudios publicados en inglés entre 2018 y 2024.

Criterios de exclusión:

1. Estudios no relacionados con el hormigón armado o la ingeniería civil.
 2. Estudios puramente teóricos o conceptuales sin datos empíricos o una revisión sistemática.
 3. Editoriales, artículos de opinión, resúmenes de conferencias.
 4. Estudios publicados antes de 2018.
-

5. Estudios duplicados o superpuestos.

La selección de estudios se realizó en dos etapas. En la primera etapa, se examinaron los títulos y resúmenes de los estudios identificados mediante la búsqueda en bases de datos y la búsqueda manual, evaluando su pertinencia según los criterios de inclusión y exclusión. Aquellos estudios que claramente no cumplían con los criterios fueron descartados, mientras que, en casos de incertidumbre, se conservaron para una evaluación más detallada en la segunda etapa (Palacios et al., 2019; Xing et al., 2022).

Durante la segunda etapa, se obtuvieron los textos completos de los estudios potencialmente relevantes y se sometieron nuevamente a una evaluación basada en los criterios de inclusión y exclusión. Se prestó especial atención a la calidad metodológica de los estudios, excluyendo aquellos que presentaran deficiencias metodológicas significativas o datos insuficientes (Afzal et al., 2020; V. Li, 2019; Sahami et al., 2019; Xing et al., 2022).

Los resultados del proceso de selección de estudios se presentan en un diagrama de flujo PRISMA (Figura 1), que muestra el número de estudios identificados, examinados, excluidos e incluidos en cada etapa del proceso.

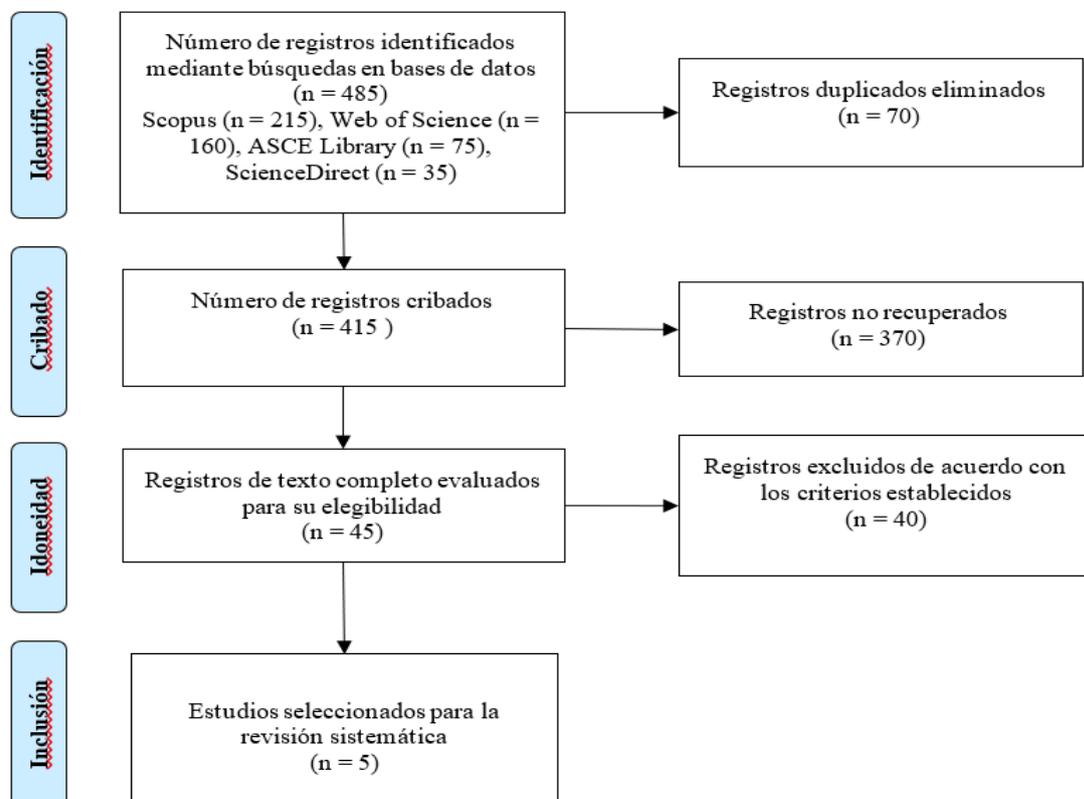


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA del proceso de selección de estudios

Nota. Adaptado de Rethlefsen & Page (2022).

El diagrama de flujo PRISMA adjunto ilustra el proceso sistemático de identificación, evaluación y selección de estudios relevantes para la revisión sistemática sobre avances en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil. La identificación de registros se llevó a cabo mediante búsquedas exhaustivas en bases de datos electrónicas, específicamente Scopus (n = 215), Web of Science (n = 160), ASCE Library (n = 75) y ScienceDirect (n = 35), obteniendo un total de 485 registros. Tras la eliminación de duplicados, se redujo el número a 415 registros únicos que pasaron a la fase de examen. Durante esta etapa, se revisaron minuciosamente los títulos y resúmenes de los 415 registros según los criterios de inclusión y exclusión predefinidos. Como resultado, se excluyeron 370 registros que no guardaban relación con el hormigón armado o la ingeniería civil (n = 220), no presentaban avances o eran puramente teóricos (n = 110), o fueron publicados antes de 2018 (n = 40) (Afzal et al., 2020; V. Li, 2019; Sahami et al., 2019).

Los 45 artículos restantes se consideraron potencialmente elegibles y se sometieron a una evaluación de texto completo. En esta fase, se aplicaron nuevamente los criterios de inclusión y exclusión, y se evaluó la calidad metodológica de los estudios. Esto condujo a la exclusión de 40 artículos adicionales que no cumplían plenamente los criterios de inclusión (n = 25), tenían una calidad metodológica deficiente (n = 10) o presentaban datos insuficientes o incompletos (n = 5) (Palacios et al., 2019; Xing et al., 2022).

Finalmente, se seleccionaron 5 estudios que cumplían todos los criterios para su inclusión en la revisión sistemática. Estos 5 estudios, publicados entre 2018 y 2021, representan las investigaciones más relevantes y de alta calidad sobre avances en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil, abarcando temas como materiales innovadores, sostenibilidad, evaluación del ciclo de vida y desempeño sísmico de estructuras prefabricadas (Afzal et al., 2020; V. Li, 2019; Palacios et al., 2019; Sahami et al., 2019; Xing et al., 2022).

RESULTADOS

Tras el proceso de selección de estudios, se incluyeron cinco artículos en la revisión sistemática. Estos estudios abordaron diversos aspectos de los avances en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil, incluyendo materiales innovadores, sostenibilidad, evaluación del ciclo de vida y desempeño sísmico de estructuras prefabricadas. La Tabla 1 presenta un resumen de las características clave de los estudios incluidos.

No .	Título	Autores (Año)	País	Diseño del estudio	Objetivo/Cas o	Hallazgos	N. Cita s
1	High-Performance and Multifunctional Cement-Based Composite Material	(Li, 2019)	Estados Unidos	Revisión	Examinar los avances en compuestos cementosos para mejorar la resiliencia y sostenibilidad de las infraestructuras	Los compuestos cementosos avanzados, como los hormigones de ultra-alto rendimiento y los hormigones autorreparables, ofrecen una mayor durabilidad y sostenibilidad en comparación con los hormigones convencionales.	52
2	Reinforced concrete structural design optimization: A critical review	(Afzal et al., 2020)	Australia	Revisión crítica	Revisar críticamente los enfoques de optimización del diseño estructural del hormigón armado	La optimización del diseño estructural del hormigón armado puede reducir significativamente el uso de materiales y los costos, al tiempo que garantiza el rendimiento y la seguridad requeridos.	110
3	Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review	(Xing et al., 2022)	China	Revisión crítica	Revisar críticamente los estudios sobre la evaluación del ciclo de vida del hormigón con áridos reciclados y su impacto ambiental	El uso de áridos reciclados en el hormigón puede disminuir los efectos ambientales durante todo su ciclo de vida, aunque es crucial tener en cuenta elementos como la calidad de los áridos y las distancias de transporte.	102
4	Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based estimations of buildings lifespans: A new approach	(Palacios et al., 2019)	España	Estudio de caso	Proponer un enfoque para evaluar la sostenibilidad de la rehabilitación vs. nuevas construcciones considerando el análisis del ciclo de vida y	La evaluación de la sostenibilidad de las estructuras de hormigón armado debe considerar tanto el análisis del ciclo de vida como la durabilidad estimada, ya que esto puede influir en las decisiones	78

					la durabilidad estimada	de rehabilitación o nueva construcción.	
5	Seismic Performance of Rocking Concrete Shear Walls with Innovative Rotational Resilient Slip Friction Joints	(Sahami et al., 2019)	Nueva Zelanda	Estudio experimental	Investigar el desempeño sísmico de muros de cortante de hormigón con juntas deslizantes friccionadas giratorias resilientes innovadoras	El uso de juntas deslizantes friccionadas giratorias resilientes innovadoras en muros de cortante de hormigón puede mejorar significativamente su desempeño sísmico, lo que resulta en estructuras más resistentes y resilientes.	14

Tabla 1. Resumen de los estudios incluidos en la revisión sistemática

Nota: Elaboración propia.

Los estudios incluidos en la revisión sistemática abarcan una variedad de enfoques metodológicos, incluyendo revisiones críticas (Afzal et al., 2020; Xing et al., 2022), una revisión general (Li, 2019), un estudio de caso (Palacios et al., 2019) y un estudio experimental (Sahami et al., 2019). Esta diversidad de diseños de estudios proporciona una visión integral de los avances en el uso del hormigón armado desde diferentes perspectivas.

Los principales temas abordados en los estudios incluyen materiales innovadores, como compuestos cementosos avanzados (Li, 2019) y hormigones con áridos reciclados (Xing et al., 2022), que apuntan a mejorar la durabilidad, sostenibilidad y resiliencia de las estructuras de hormigón armado. Además, se destaca la importancia de la optimización del diseño estructural (Afzal et al., 2020) para reducir el uso de materiales y los costos, garantizando al mismo tiempo el rendimiento y la seguridad requeridos.

La sostenibilidad es otro tema central, con estudios que evalúan el impacto ambiental del hormigón con áridos reciclados a lo largo de su ciclo de vida (Xing et al., 2022) y proponen enfoques para evaluar la sostenibilidad de la rehabilitación versus nuevas construcciones considerando tanto el análisis del ciclo de vida como la durabilidad estimada (Palacios et al., 2019). Estos estudios resaltan la importancia de adoptar prácticas más sostenibles en la construcción de estructuras de hormigón armado.

Además, se exploran innovaciones en aplicaciones especializadas, como el uso de juntas deslizantes friccionadas giratorias resilientes para mejorar el desempeño sísmico de muros de cortante de hormigón (Sahami et al., 2019). Este estudio experimental destaca el potencial de las nuevas tecnologías para aumentar la resistencia y resiliencia de las estructuras de hormigón armado frente a eventos sísmicos.

En conjunto, estos estudios proporcionan evidencia sólida de los avances significativos en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil, con un enfoque particular en la mejora de la sostenibilidad, durabilidad y rendimiento a través de innovaciones en materiales, diseño y tecnologías especializadas. Los hallazgos respaldan la adopción de enfoques más sostenibles y resilientes en la construcción de estructuras de hormigón armado, al tiempo que destacan áreas para futuras investigaciones y desarrollos.

Es importante destacar que los estudios seleccionados han recibido un número considerable de citas, lo que indica su relevancia e impacto en el campo de la ingeniería civil. Esto sugiere que los temas abordados en estos estudios son de gran interés para la comunidad científica y tienen el potencial de influir en la práctica y las políticas relacionadas con el uso del hormigón armado en la construcción.

DISCUSIÓN

En las últimas décadas, se han producido avances significativos en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil, abarcando desde mejoras en el diseño y la optimización estructural hasta el desarrollo de materiales innovadores y aplicaciones especializadas. Los estudios incluidos en esta revisión sistemática resaltan la importancia de estos avances para la construcción de estructuras más seguras, eficientes y sostenibles.

En términos de diseño y optimización estructural, Afzal et al. (2020), destacan la relevancia de los enfoques computacionales avanzados, como el método de elementos finitos, para simular el comportamiento del hormigón armado bajo diferentes cargas y condiciones. Estos hallazgos son respaldados por otros estudios, como el de Stochino y Gayarre (2019), que demuestra cómo la optimización topológica puede reducir significativamente el uso de materiales en estructuras de hormigón armado sin comprometer su rendimiento. Además, Aslani y Dehestani (2020), enfatizan la importancia de considerar la durabilidad y la resistencia a la corrosión en el diseño estructural, lo que se alinea con los resultados de Palacios et al. (2019), sobre la evaluación de la sostenibilidad considerando tanto el análisis del ciclo de vida como la durabilidad estimada.

En cuanto a materiales innovadores, Li (2019), destaca el potencial de los compuestos cementosos avanzados, como el hormigón de ultra-alto rendimiento (UHPC), para mejorar la resiliencia y sostenibilidad de las infraestructuras. Estos hallazgos son consistentes con los de Koga et al. (2020), que demuestran las propiedades mecánicas superiores y la durabilidad del UHPC en comparación con el hormigón convencional. Además, la incorporación de fibras de refuerzo en el hormigón armado, como se discute en Díaz (2021), ha sido respaldada por estudios como el de Makul (2020), que muestra cómo las fibras pueden mejorar la resistencia a la tracción, la tenacidad y el control de grietas en estructuras de hormigón armado.

La sostenibilidad y el reciclaje también han sido temas centrales en los avances del hormigón armado. Xing et al. (2022), resaltan el potencial de los áridos reciclados para reducir los impactos ambientales del hormigón a lo largo de su ciclo de vida. Estos hallazgos son respaldados por estudios como el de Deresa et al. (2020), que demuestra cómo la incorporación de áridos reciclados puede reducir la huella de carbono del hormigón sin comprometer significativamente sus propiedades mecánicas. Además, el uso de adiciones minerales como sustitutos parciales del cemento, como se discute en Shaban et al. (2019), ha sido respaldado por investigaciones como la de Juenger et al. (2019), que muestran cómo estos materiales pueden mejorar la durabilidad y reducir las emisiones de CO₂ asociadas con la producción de cemento.

En cuanto a las aplicaciones especializadas, el estudio experimental de Sahami et al. (2019) sobre el desempeño sísmico de muros de cortante de hormigón con juntas deslizantes friccionadas giratorias resilientes es consistente con los hallazgos de Wang y Zhao (2018), que demuestran cómo estas innovaciones pueden mejorar significativamente la resistencia y resiliencia de las estructuras de hormigón armado frente a eventos sísmicos. Además, la aplicación del hormigón armado en estructuras marinas y de energías renovables, como se discute en Sohail et al. (2021), ha sido respaldada por estudios como el de Ebead et al. (2022), que destaca la importancia de los hormigones especiales y los tratamientos de superficie para garantizar la durabilidad en estos entornos desafiantes.

A pesar de los avances significativos en el uso del hormigón armado, aún existen desafíos y oportunidades para futuras investigaciones. Como señalan Siddika et al. (2020), es necesario seguir desarrollando modelos predictivos más precisos para evaluar la vida útil y el rendimiento a largo plazo de las estructuras de hormigón armado, especialmente en condiciones ambientales adversas. Además, como sugieren Rodrigues et al. (2021), la

integración de tecnologías emergentes, como los sensores incorporados y la inteligencia artificial, podría revolucionar el monitoreo y mantenimiento de las estructuras de hormigón armado, permitiendo una detección temprana de daños y una toma de decisiones más informada.

Los avances en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil han sido significativos y multifacéticos, abarcando desde mejoras en el diseño y la optimización estructural hasta el desarrollo de materiales innovadores y aplicaciones especializadas. Los estudios incluidos en esta revisión sistemática, junto con investigaciones complementarias, respaldan la importancia de estos avances para la construcción de estructuras más seguras, eficientes y sostenibles. Sin embargo, aún existen desafíos y oportunidades para futuras investigaciones, como el desarrollo de modelos predictivos más precisos y la integración de tecnologías emergentes para el monitoreo y mantenimiento de las estructuras de hormigón armado. A medida que la industria de la construcción continúa evolucionando, es fundamental seguir explorando e implementando estos avances para abordar los desafíos globales de sostenibilidad, resiliencia y eficiencia en la ingeniería civil.

CONCLUSIONES

Los avances en el uso del hormigón armado en la ingeniería civil han sido significativos y multifacéticos. El diseño y la optimización estructural han experimentado mejoras sustanciales gracias a la aplicación de teorías de diseño avanzadas y herramientas computacionales, permitiendo maximizar la eficiencia y minimizar el uso de materiales, garantizando el rendimiento y la seguridad requeridos. La introducción de materiales innovadores ha mejorado las propiedades mecánicas, la durabilidad y la sostenibilidad de las estructuras, mientras que la sostenibilidad y el reciclaje han emergido como temas centrales, enfocados en reducir la huella ambiental. El hormigón armado también se ha adaptado a aplicaciones especializadas mediante el uso de hormigones especiales y detalles constructivos innovadores.

A pesar de los avances, aún existen desafíos y oportunidades para futuras investigaciones, como el desarrollo de modelos predictivos más precisos para evaluar la vida útil y el rendimiento a largo plazo, y la integración de tecnologías emergentes para el monitoreo y mantenimiento de las estructuras. Es fundamental seguir explorando e implementando estos desarrollos para abordar los desafíos globales en la ingeniería civil a medida que la industria de la construcción continúa evolucionando.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Afzal, M., Liu, Y., Cheng, J., & Gan, V. (2020). Reinforced concrete structural design optimization: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 260(1), 120623. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120623>
- Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 15(March), e00559. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>
- Andrea, D., & Hernández, L. (2022). Análisis de estudios aplicados a la construcción de vivienda de interés social sostenible en Cúcuta sustainable social interest in Cúcuta. *Formacion Estrategica*, 3(2), 16–29. <https://www.formacionestrategica.com/index.php/foes/article/view/81>
- Araca, F., Gómez, L., Cahui, A., & Marín, G. (2020). Influence of soil-structure interaction on the behaviour of houses framed with isolated footings in the city of Juliaca. *Revista Científica de La UCSA*, 7(2), 70–81. <https://doi.org/10.18004/ucsa/2409-8752/2020.007.02.070>
- Araujo, R. (2020). Construir en altura: sistemas, tipos y estructuras. Reverté. <https://books.google.es/books?id=BrT1DwAAQBAJ&lpg=PA5&ots=qoDzKNUc wV&dq=Además de las mejoras en el diseño conceptual%2C se han desarrollado innovaciones en conectores y detalles constructivos para optimizar la transferencia de cargas entre el hormigón y>
- Aslani, F., & Dehestani, M. (2020). Probabilistic impacts of corrosion on structural failure and performance limits of reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 265, 120316. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120316>
- Bertelsen, I., Ottosen, L., & Fischer, G. (2020). Influence of fibre characteristics on plastic shrinkage cracking in cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials*, 230(1), 116769. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116769>
- Cabezas, G. (2019). Diseño de una losa de hormigón liviano de poliestireno expandido reciclado modificado. *Revista Ingeniería*, 3(6), 110–126. <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v3i6.37>
- Cejuela, E., Negro, V., del Campo, J. M., Martín-Antón, M., Esteban, M. D., & López-Gutiérrez, J. S. (2018). Recent history, types, and future of modern caisson

- technology: The way to more sustainable practices. *Sustainability* (Switzerland), 10(11), 1–30. <https://doi.org/10.3390/su10113839>
- Choo, B., & MacGinley, T. (2018). Reinforced Concrete Design Theory and Examples.
- Deresa, S., Xu, J., Demartino, C., Heo, Y., Li, Z., & Xiao, Y. (2020). A review of experimental results on structural performance of reinforced recycled aggregate concrete beams and columns. *Advances in Structural Engineering*, 23(15), 3351–3369. <https://doi.org/https://doi.org/10.1177/136943322093456>
- Díaz, A. (2021). Diseño a Corte de Elementos de Hormigón Armado con Fibras de Acero. *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, 1(9), 1–20. https://www.researchgate.net/profile/Martin-Almenar/publication/363539642_DISENO_A_CORTE_DE_ELEMENTOS_DE_HORMIGON_ARMADO_CON_FIBRAS_DE_ACERO/links/6321ebb5071ea12e36327434/DISENO-A-CORTE-DE-ELEMENTOS-DE-HORMIGON-ARMADO-CON-FIBRAS-DE-ACERO.pdf
- Ebead, U., Lau, D., Lollini, F., Nanni, A., Suraneni, P., & Yu, T. (2022). A review of recent advances in the science and technology of seawater-mixed concrete. *Cement and Concrete Research*, 152(1), 106666. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106666>
- Giovambattista, A., Zerbino, R., Giaccio, G., & Fava, C. (2020). Bases de un Código Modelo para la Tecnología de las obras de Hormigón. <http://hdl.handle.net/11336/159388>
- Guerra, F., Carranza, Y., Blanco, H., & Peñuela, C. (2018). Efecto de los sólidos suspendidos en el agua de mezclado sobre las propiedades del concreto. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 29(1), 8.
- Hassoun, N., & Al-Manaseer, A. (2020). *Structural concrete: theory and design*. John Wiley & Sons. <https://books.google.es/books?id=1tXKDwAAQBAJ&lpg=PR13&ots=RW251J8i1A&lr&hl=es&pg=PR13#v=onepage&q&f=false>
- Hooton, R. (2019). Future directions for design, specification, testing, and construction of durable concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 124(1), 105827. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105827>
- Jagan, S., Neelakantan, T., & Saravanakumar, P. (2021). Mechanical properties of recycled aggregate concrete treated by variation in mixing approaches. *Revista de La Construcción*, 20(2), 236–248. <https://doi.org/10.7764/RDLC.20.2.35>

- Johnson, R. (2018). *Composite Structures of Steel and Concrete: beams, slabs, columns and frames for buildings*. John Wiley & Sons. https://books.google.es/books?id=NxVqDwAAQBAJ&lpg=PR11&ots=5Oo7_aNxfW&lr&hl=es&pg=PR1#v=onepage&q&f=false
- Juenger, M., Snellings, R., & Bernal, S. (2019). Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. *Cement and Concrete Research*, 122(1), 257–273. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Koga, G., Albert, B., & Nogueira, R. (2020). On the hydration of Belite-Ye'elimitate Ferrite (BYF) cement pastes: Effect of the water-to-cement ratio and presence of fly ash. *Cement and Concrete Research*, 137(1), 106215. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106215>
- Li, V. (2019). High-Performance and Multifunctional Cement-Based Composite Material. *Engineering*, 5(2), 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.031>
- Li, Z., Zhou, X., Ma, H., & Hou, D. (2022). *Advanced concrete technology*. John Wiley & Sons. <https://books.google.es/books?id=Xet9EAAAQBAJ&lpg=PR11&ots=bqOyGsouvc&lr&hl=es&pg=PA612#v=onepage&q&f=false>
- Makul, N. (2020). Modern sustainable cement and concrete composites: Review of current status, challenges and guidelines. *Sustainable Materials and Technologies*, 25(1), e00155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00155>
- Mastropiero, M. (2021). *El hormigón para arquitectos*. Diseño. <https://books.google.es/books?id=PhstEAAAQBAJ&lpg=PA105&ots=p1Uo8W3iOq&lr&hl=es&pg=PA134#v=onepage&q&f=false>
- Olivera, Y., Guevara, S., & Muñoz, S. (2022). Revisión sistemática de la literatura sobre mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto adicionando fibras artificiales y naturales. *Ingeniería*, 27(2), e18207. <https://doi.org/10.14483/23448393.18207>
- Pacheco, C., Fuentes, L., Sánchez, É., & Rondón, H. (2017). *Ingeniería y Desarrollo*. *Revista Científica Ingeniería y Desarrollo*, 35(2), 533–555. <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v35n2/2145-9371-inde-35-02-00533.pdf>
- Palacios, B., Peupartier, B., Gracia, L., & López, B. (2019). Sustainability assessment of refurbishment vs. new constructions by means of LCA and durability-based

-
- estimations of buildings lifespans: A new approach. *Building and Environment*, 160(1), 106203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106203>
- Rethlefsen, M. L., & Page, M. J. (2022). PRISMA 2020 and PRISMA-S: common questions on tracking records and the flow diagram. In *Journal of the Medical Library Association* (Vol. 110, Issue 2, pp. 253–257). <https://doi.org/10.5195/jmla.2022.1449>
- Rodrigues, R., Gaboreau, S., Gance, J., Ignatiadis, I., & Betelu, S. (2021). Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring. *Construction and Building Materials*, 269(1), 121240. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240>
- Romano, C., Alías, M., & Jacobo, J. (2018). Lineamientos e indicadores para la valoración de la sustentabilidad edilicia, de factible incorporación a las normativas de edificación vigentes en resistencia y corrientes. In *X Congreso Regional de Tecnología En Arquitectura (CRETA)*, 490–501. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/71122>
- Sahami, K., Veismoradi, S., Zarnani, P., & Quenneville, P. (2019). Seismic performance of rocking concrete shear walls with innovative rotational resilient slip friction joints. *Pacific Conference on Earthquake Engineering (PCEE) and New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE)*, Auckland, New Zealand, 1(1), 1–11. [https://db.nzsee.org.nz/2019/Oral/4B.09 Sahami.pdf](https://db.nzsee.org.nz/2019/Oral/4B.09%20Sahami.pdf)
- Serrano, A., & Martínez, J. (2021). Una revisión biográfica y significativa de las estructuras mixtas de hormigón y acero estructural. *Hormigón y Acero*, 72(293), 7–29. <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2023>
- Shaban, W., Yang, J., Su, H., Mo, K. H., Li, L., & Xie, J. (2019). Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: A review. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 17(4), 151–167. <https://doi.org/https://doi.org/10.3151/jact.17.151>
- Shetty, M., & Jain, A. (2019). *Concrete Technology (Theory and Practice)*, 8e. S. Chand Publishing. <https://books.google.es/books?id=4O3sDwAAQBAJ&lpg=PR1&ots=7ko4XkfMh6&lr&hl=es&pg=PA636#v=onepage&q&f=false>
- Siddika, A., Al Mamun, A., Ferdous, W., & Alyousef, R. (2020). Performances, challenges and opportunities in strengthening reinforced concrete structures by
-

-
- using FRPs--A state-of-the-art review. *Engineering Failure Analysis*, 111(1), 104480. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104480>
- Sohail, M., Kahraman, R., Al Nuaimi, N., Gencturk, B., & Alnahhal, W. (2021). Durability characteristics of high and ultra-high performance concretes. *Journal of Building Engineering*, 33(5), 101669. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101669>
- Stochino, F., & Gayarre, F. (2019). Reinforced concrete slab optimization with simulated annealing. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(15), 1–14. <https://doi.org/10.3390/app9153161>
- Tibbetts, C., Paris, J., Ferraro, C., Riding, K., & Townsend, T. (2020). Relating water permeability to electrical resistivity and chloride penetrability of concrete containing different supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 107(1), 103491. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.10349>
- Unal, M., Abdullah, S., Kolozvari, K., Wallace, J., & Kajiwara, K. (2023). Evaluation of ACI 318-19 provisions for special moment frames and special structural walls using data from the E-Defense 10-story tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(15), 6699–6721. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10518-023-01718-7>
- Visintin, P., Ali, M., Xie, T., & Sturm, A. (2018). Experimental investigation of moment redistribution in ultra-high performance fibre reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials*, 166(1), 433–444. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.156>
- Wang, J., & Zhao, H. (2018). High Performance Damage-Resistant Seismic Resistant Structural Systems for Sustainable and Resilient City: A Review. *Shock and Vibration*, 2018(1), 1–33. <https://doi.org/10.1155/2018/8703697>
- Xing, W., Tam, V., Le, K., Hao, J., & Wang, J. (2022). Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. *Construction and Building Materials*, 317(1), 125950. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125950>
-