DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 385-397

Materiales reciclados, subproductos industriales y nanomateriales en concretos sustentables
Recycled materials, industrial by-products, and nanomaterials in sustainable concrete

D. N. Cardoso-Quiroz[a], V. Volpi-León[a], A. L. López-León[b], L. D. López-León[a,*]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*
[b] *Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Av. del Charro No.450 Nte. Col. Partido Romero, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.*

Resumen

El concreto sustentable representa una alternativa viable para reducir el impacto ambiental asociado a la producción de cemento Portland y al consumo de recursos naturales. Esta revisión analiza el efecto de materiales reciclados, subproductos industriales, residuos agrícolas y nanomateriales sobre las propiedades mecánicas, la durabilidad y la sostenibilidad del concreto. Los agregados reciclados disminuyen la extracción de recursos, aunque pueden afectar la resistencia y la durabilidad debido a su mayor porosidad y debilidad en la zona de transición interfacial. Los materiales cementantes suplementarios y los nanomateriales compensan estas deficiencias mediante el refinamiento microestructural y la densificación de la matriz cementante. Asimismo, tecnologías emergentes como la carbonatación acelerada y los sistemas híbridos muestran un alto potencial para reducir emisiones de CO_2 y mejorar el desempeño global. No obstante, persisten desafíos relacionados con la variabilidad de los residuos, la estandarización y la validación a largo plazo en aplicaciones estructurales.

Palabras clave: concreto sustentable; agregados reciclados; materiales cementantes suplementarios; nanomateriales; economía circular.

Abstract

Sustainable concrete represents a viable alternative for reducing the environmental impact associated with Portland cement production and the consumption of natural resources. This review analyses the influence of recycled materials, industrial by-products, agricultural waste, and nanomaterials on the mechanical properties, durability, and sustainability of concrete. Recycled aggregates reduce natural resource extraction; however, their higher porosity and weaker interfacial transition zone may negatively affect strength and durability. Supplementary cementitious materials and nanomaterials compensate for these deficiencies through microstructural refinement and matrix densification. Emerging technologies such as accelerated carbonation and hybrid systems also demonstrate significant potential for reducing CO_2 emissions while improving overall performance. Nevertheless, important challenges remain regarding waste variability, lack of standardization, and long-term validation under real structural conditions. Overall, sustainable concrete systems show strong potential for supporting low-carbon and circular construction practices while maintaining adequate engineering performance.

Keywords: sustainable concrete; recycled aggregates; supplementary cementitious materials; nanomaterials; circular economy.

1. Introducción

El concreto es el material de construcción más empleado del mundo por su versatilidad y desempeño, pero su producción genera graves impactos ambientales. La fabricación de cemento Portland, responsable de una fracción sustancial de las emisiones globales de CO_2, libera aproximadamente una tonelada de este gas por cada tonelada de cemento producido (UNEP, 2024; Scrivener et al., 2021; Rezzoug et al., 2025; Baki et al., 2026). Esta problemática ha impulsado el desarrollo de concretos sustentables que, mediante materiales alternativos y tecnologías innovadoras, reduzcan el consumo de recursos naturales y las emisiones sin sacrificar el desempeño estructural (Akter & Hawas, 2025; Marandi & Shirzad, 2025). Entre las principales estrategias destacan los materiales cementantes suplementarios (SCM), los agregados reciclados y los sistemas geopoliméricos, que disminuyen el contenido de clínker y las emisiones asociadas (Rezzoug et al., 2025).

*Autor para la correspondencia: luis_lopez@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: ca276907@uaeh.edu.mx (Diego Naim Cardoso-Quiroz), volpi@uaeh.edu.mx (Valeria Volpi-León), abraham.lopez@uacj.mx (Abraham Leonel López-León), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López-León)

Historial del manuscrito: recibido el 29/05/2026, última versión-revisada recibida el 11/09/2026, aceptado el 30/10/2026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18009

CC BY NC ND



Figura 1. *Esquema conceptual del desarrollo de concretos sustentables mediante materiales reciclados, subproductos industriales y nanomateriales.*

La valorización de residuos, en concordancia con los principios de la economía circular, ha cobrado especial relevancia. Residuos de construcción y demolición, así como subproductos industriales y agrícolas, pueden sustituir parcial o totalmente a los componentes convencionales del concreto (Silva et al., 2022; Akbulut et al., 2025). No obstante, los agregados reciclados suelen presentar mayor porosidad y absorción de agua, lo que afecta la trabajabilidad, resistencia y durabilidad. Estrategias como el pretratamiento, el uso de SCM y la optimización de mezclas permiten mitigar estas limitaciones. Por su parte, la ceniza de cáscara de arroz (RHA, por sus siglas en inglés Rice Husk Ash) actúa como puzolana eficaz, densificando la matriz cementante y compensando las deficiencias de los agregados reciclados (Suomie et al., 2025). Otros residuos, como plásticos reciclados o cenizas de lodos, reducen el consumo de materias primas, pero suelen disminuir la resistencia mecánica, limitándolos a aplicaciones no estructurales (Kabadzha et al., 2026). Enfoques más innovadores integran finos de concreto reciclado en sistemas cementantes avanzados con activación mecanoquímica, mejorando su reactividad y capacidad de captura de CO_2 (Baki et al., 2026). Paralelamente, la nanotecnología ha permitido desarrollar concretos con nanopartículas de sílice, nanotubos de carbono (CNT) y óxido de grafeno (GO), que mejoran la microestructura, la resistencia a compresión, la permeabilidad y la durabilidad frente a carbonatación y corrosión (Zhang et al., 2023; Li et al., 2022). En particular, los CNT, incluso a bajas dosis, incrementan la resistencia mecánica y la durabilidad, especialmente cuando se combinan con fibras y agregados reciclados tratados (Rezzoug et al., 2025), mientras que el GO mejora la zona de transición interfacial en concretos reciclados (Lu et al., 2024).

Pese al creciente número de investigaciones, los resultados son muy variables debido al tipo de material, porcentaje de sustitución, condiciones de curado y métodos de caracterización. Persisten desafíos en estandarización, reproducibilidad y evaluación del desempeño a largo plazo en ambientes agresivos (Olsson et al., 2025; Thomas et al., 2022; Akbulut et al., 2025). El presente estudio analiza el comportamiento de concretos sustentables elaborados con materiales reciclados, subproductos industriales y nanomateriales, evaluando su influencia en las propiedades mecánicas, durabilidad e impacto ambiental, así como las principales tendencias y desafíos asociados a su implementación en sistemas constructivos sostenibles (figura 1).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es analizar críticamente la influencia de cuatro grupos de materiales alternativos: (i) residuos de construcción y demolición; (ii) subproductos industriales y agrícolas; (iii) materiales de origen natural o volcánico; y (iv) nanomateriales. El análisis se delimita a sus efectos sobre la trabajabilidad, las propiedades mecánicas, la durabilidad y el desempeño ambiental del concreto. Asimismo, se examinan estrategias de incorporación directamente relacionadas con estos materiales, como el pretratamiento de agregados reciclados, la sustitución parcial de componentes convencionales, la modificación de la matriz cementante y algunas tecnologías de curado. Esta delimitación permite establecer comparaciones entre los resultados reportados e identificar tendencias, limitaciones y oportunidades para el desarrollo de concretos sustentables.

2. Enfoque metodológico

Las revisiones narrativas presentan una descripción amplia y flexible del conocimiento disponible; las revisiones críticas, además de resumir la literatura, comparan metodologías, identifican inconsistencias y formulan interpretaciones sobre las fortalezas, limitaciones y vacíos de la evidencia. En contraste, las revisiones sistemáticas siguen un protocolo previamente definido, aplican procedimientos exhaustivos y reproducibles de búsqueda y selección y, cuando la homogeneidad de los datos lo permite, pueden incorporar un metaanálisis (Ferrari, 2015; Snyder, 2019).

Con base en esta distinción, el presente trabajo se define como una revisión crítica de alcance narrativo sustentada en una búsqueda bibliográfica estructurada. El manuscrito no pretende constituir una revisión sistemática ni un metaanálisis, debido a la heterogeneidad de los materiales, dosificaciones, métodos de ensayo, condiciones de curado y variables de desempeño reportadas. La búsqueda y selección se documentaron para proporcionar transparencia y trazabilidad; posteriormente, los estudios se compararon críticamente con el propósito de identificar tendencias, discrepancias, limitaciones y oportunidades de investigación relacionadas con los concretos sustentables.

- **Metodología de revisión**

El presente trabajo corresponde a una revisión crítica de alcance narrativo, sustentada en una búsqueda bibliográfica estructurada. Este tipo de revisión permite integrar, comparar e interpretar resultados procedentes de estudios con diseños, materiales y variables heterogéneas, sin aplicar necesariamente los procedimientos propios de una revisión sistemática o un metaanálisis (Snyder, 2019; Ferrari, 2015). Su propósito fue identificar y analizar la evidencia disponible sobre el uso de materiales reciclados, subproductos industriales, materiales de origen natural y nanomateriales en concretos sustentables. Para mejorar la transparencia y trazabilidad del proceso, se estableció un procedimiento explícito de búsqueda, selección, evaluación y síntesis de la literatura.

- **Estrategia de búsqueda**

La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos Scopus, Web of Science y ScienceDirect, con una búsqueda complementaria en Google Scholar, durante el periodo comprendido entre el 15 de enero y el 15 de mayo de 2026. Se consideraron principalmente publicaciones comprendidas entre 2021 y 2026, aunque se incluyeron estudios anteriores cuando aportaban fundamentos conceptuales o resultados relevantes para la comparación. Las expresiones de búsqueda combinaron los términos “sustainable concrete”, “recycled aggregate concrete”, “industrial waste concrete”, “supplementary cementitious materials”, “nano-modified concrete”, “low-carbon concrete”, “mechanical properties”, “durability” y “life cycle assessment”, mediante los operadores booleanos AND y OR.

- **Criterios de inclusión y exclusión**

Se incluyeron artículos científicos y revisiones publicados en inglés o español que: (i) evaluaran concretos o materiales cementantes con materiales reciclados, subproductos industriales, residuos agrícolas, materiales naturales o nanomateriales; (ii) presentaran resultados relacionados con propiedades en estado fresco, comportamiento mecánico, durabilidad o desempeño ambiental; (iii) describieran los materiales, porcentajes de sustitución y procedimientos experimentales; y (iv) contaran con texto completo disponible.

Se excluyeron documentos duplicados, resúmenes de congresos, publicaciones sin información metodológica suficiente, estudios no relacionados directamente con matrices cementantes y trabajos cuyos resultados no permitieran establecer una comparación técnica.

- **Proceso de depuración**

La búsqueda inicial produjo 186 registros. Después de eliminar 31 documentos duplicados, se revisaron los títulos y resúmenes de 155 publicaciones. Posteriormente, 68 documentos fueron evaluados a texto completo y se excluyeron 21 por no cumplir los criterios de elegibilidad. El corpus final quedó integrado por 47 estudios, organizados en cuatro grupos: (i) residuos de construcción y demolición; (ii) subproductos industriales y agrícolas; (iii) materiales de origen natural o volcánico; y (iv) nanomateriales.

- **Evaluación y síntesis de la evidencia**

La calidad y pertinencia de los estudios se valoraron mediante una matriz de análisis, siguiendo criterios de transparencia metodológica y evaluación crítica de la evidencia recomendados para revisiones de literatura (Snyder, 2019; Ferrari, 2015).

La matriz consideró la claridad del objetivo,la descripción de los materiales y dosificaciones, la identificación de los métodos de ensayo, la presentación de resultados cuantitativos, la comparación con una mezcla de referencia y la coherencia entre los resultados y las conclusiones.

- **Delimitación temática**

La revisión se delimitó al estudio de materiales alternativos incorporados en matrices de concreto y a su influencia en cuatro dimensiones de desempeño: estado fresco, comportamiento mecánico, durabilidad y sostenibilidad ambiental. No se abordaron de manera exhaustiva aspectos económicos, análisis estructurales a escala de elemento, procedimientos constructivos, normativas de diseño ni aplicaciones distintas del concreto.

Los geopolímeros, la carbonatación acelerada y las tecnologías de autocuración se incluyeron únicamente cuando estuvieron vinculados con alguno de los grupos de materiales seleccionados y aportaron evidencia relevante para explicar su desempeño o potencial ambiental.

3. Clasificación de materiales y análisis

A partir de la metodología descrita, los estudios se organizaron según el tipo de material incorporado al concreto para comparar su influencia en el comportamiento fresco, propiedades mecánicas, durabilidad y sostenibilidad.

3.1. Concretos con residuos de construcción y demolición (RCD)

El uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) es una de las estrategias más consolidadas para reducir la extracción de agregados naturales y la disposición en vertederos (Akbulut et al., 2025). Sin embargo, el mortero adherido, la mayor porosidad y la alta absorción de agua reducen la trabajabilidad, resistencia y durabilidad, especialmente a altos porcentajes de sustitución (Silva et al., 2022; Akbulut et al., 2025).

Niveles de reemplazo moderados (20–50%) permiten un desempeño estructural aceptable, mientras que sustituciones más elevadas requieren pretratamientos, SCM o fibras. La zona de transición interfacial (ITZ, por sus siglas en inglés Interfacial Transition Zone) juega un papel crítico en la resistencia y durabilidad de estos concretos.

3.2. Concretos con subproductos industriales y agrícolas

Cenizas volantes, escorias de alto horno y ceniza de cáscara de arroz (RHA) se utilizan ampliamente como SCM por su capacidad puzolánica y su contribución a la reducción del

cemento Portland (Thomas et al., 2022). La RHA destaca por su alto contenido de sílice amorfa y gran superficie específica, que favorecen la formación de gel C-S-H, densifican la matriz y mejoran propiedades mecánicas y durabilidad (Suomie et al., 2025).

La combinación de subproductos industriales con agregados reciclados produce efectos sinérgicos: los materiales puzolánicos compensan la pérdida de resistencia al mejorar la matriz cementante y reducir la porosidad (Suomie et al., 2025). Las principales dificultades corresponden a la variabilidad de los materiales, la falta de estandarización y la necesidad de optimizar las dosificaciones para aplicaciones estructurales.

3.3. Concretos con materiales de origen natural o volcánico

Materiales como basalto y tezontle, disponibles localmente en ciertas regiones, constituyen una alternativa prometedora como sustitutos parciales de agregados o adiciones minerales por su composición rica en sílice y potencial reactividad. Pueden reducir el peso volumétrico, mejorar la retención de agua y favorecer propiedades térmicas y de durabilidad, aunque su desempeño depende de la porosidad, granulometría y procesamiento.

La literatura sobre estos materiales es menos extensa que la de reciclados e industriales, lo que representa un área de oportunidad para evaluar su desempeño a largo plazo y su interacción con otros cementantes.

3.4. Concretos modificados con nanomateriales

La nanosílice, los CNT y el GO actúan a escala nanométrica modificando la microestructura de la pasta cementante (Zhang et al., 2023). Su incorporación mejora significativamente la resistencia a compresión, la durabilidad y la resistencia a agentes agresivos mediante efectos de relleno, nucleación de productos de hidratación y refinamiento de poros (Li et al., 2022).

En concretos con agregados reciclados, los nanomateriales mejoran la calidad de la ITZ (Lu et al., 2024). No obstante, su aplicación a gran escala enfrenta limitaciones como el alto costo, las dificultades de dispersión y la ausencia de normativas específicas.

3.5. Síntesis comparativa

Cada tipo de material presenta ventajas y limitaciones específicas: los agregados reciclados ofrecen beneficios ambientales, pero pueden comprometer el desempeño mecánico; los SCM mejoran la microestructura y compensan deficiencias; los nanomateriales optimizan el comportamiento a escala microestructural.

La tendencia actual se orienta hacia sistemas híbridos que combinan diferentes materiales para maximizar beneficios y minimizar limitaciones, constituyendo una de las principales líneas de investigación en el área (Akbulut et al., 2025; Suomie et al., 2025).

4. Propiedades mecánicas del concreto sustentable

El desempeño mecánico del concreto sustentable es un factor crítico para su uso estructural, pues la incorporación de materiales alternativos modifica significativamente su comportamiento resistente. Dicho desempeño depende del tipo y porcentaje de sustitución, la calidad de los agregados y la microestructura de la matriz cementante (Akbulut et al., 2025; Thomas et al., 2022).

4.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión, propiedad que define la capacidad del concreto para soportar cargas, se ve afectada por la incorporación de materiales alternativos. El uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) generalmente disminuye esta propiedad, especialmente con mayores ciclos de reciclaje, debido al mortero adherido, la mayor porosidad y el debilitamiento de la zona de transición interfacial (ITZ). Se han reportado reducciones superiores al 10% en ciclos avanzados (Kovacs et al., 2025). No obstante, cuando los agregados reciclados provienen de concretos de alta calidad y baja contaminación, la resistencia puede mantenerse o incluso mejorar ligeramente (Kovacs et al., 2025).

Altos contenidos de ceniza volante en sistemas como el concreto aireado autoclavado incrementan la porosidad y pueden reducir la resistencia hasta un 30%, aunque proporciones moderadas favorecen el refinamiento microestructural (Zou et al., 2025). La incorporación de fibras (polipropileno y vidrio) en dosis óptimas mejora la resistencia hasta un 15% al controlar microfisuras, mientras contenidos excesivos generan vacíos y defectos.

Aunque estos resultados muestran que las dosificaciones moderadas pueden conservar o mejorar el desempeño mecánico, los porcentajes reportados no deben generalizarse, debido a que proceden de concretos con diferentes materiales, relaciones agua/cemento, métodos de mezclado y condiciones de curado. La tendencia observada indica la existencia de una dosificación óptima, a partir de la cual los efectos de dilución, aglomeración o incremento de porosidad superan los beneficios microestructurales.

En conjunto, la resistencia a compresión presenta un comportamiento no lineal: sustituciones bajas o moderadas pueden mantener o mejorar el desempeño, mientras niveles elevados lo deterioran, haciendo esencial optimizar las dosificaciones.

4.2. Resistencia a la tracción

La resistencia a tracción es mucho más sensible a los materiales alternativos que la compresión, pues depende de la integridad de la ITZ y del control de fisuras. Los nanomateriales actúan directamente sobre la microestructura: la nanosílice (NS) densifica la matriz cementante mediante relleno y reacciones puzolánicas, mejorando la tracción (Rezaei et al., 2023). El óxido de grafeno (GO) introduce un efecto puente a nanoescala que limita la propagación de microfisuras (Zhang et al., 2022).

Las fibras recicladas operan a escala macroestructural: las fibras de acero recuperadas de neumáticos (RTSF, por sus siglas en inglés Recycled Tire Steel Fibers) incrementan la resistencia a la tracción por división hasta un 100% y la flexión un 116.8% en concretos ligeros de alta resistencia con contenidos óptimos cercanos al 1.0% (Peng et al., 2025).

La combinación con agregados ligeros orgánicos mejora la tracción hasta un 32.6% (Motloq, 2024), y las fibras de PET reciclado han permitido desarrollar modelos predictivos (Lima et al., 2017).

Tanto los nanomateriales como las fibras compensan las pérdidas ocasionadas por agregados reciclados mediante mecanismos complementarios.

Sin embargo, ambos presentan un comportamiento óptimo-declive: dosis elevadas (>3% NS, >0.15% GO o >1.5% de fibras) provocan aglomeración y vacíos, reduciendo la resistencia por debajo del concreto de referencia (Zhang et al., 2022; Peng et al., 2025). Por ello, una dosificación y dispersión adecuadas son fundamentales.

4.3. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, parámetro que define las deformaciones en el rango elástico y la distribución de esfuerzos, disminuye al sustituir agregado natural por agregado grueso reciclado (RCA) debido al mortero adherido, que genera una ITZ más porosa y menos rígida (Abdel-Hay, 2025). Esta reducción aumenta con mayores porcentajes de reemplazo.

Los SCM y las fibras mitigan parcialmente este efecto al mejorar la matriz y la ITZ (Yasin et al., 2024; Khan et al., 2024). La sustitución del cemento por geopolímeros también reduce la rigidez por diferencias microestructurales y microfisuración (Golafshani et al., 2024), aunque nanomateriales, fibras y, bajo condiciones adecuadas, fibras naturales pueden compensarla (Lv et al., 2023; Alcivar-Bastidas et al., 2024; Li et al., 2024).

Ante la variabilidad inherente de estos materiales, los modelos basados en inteligencia artificial predicen el módulo de elasticidad con mayor precisión que los modelos empíricos tradicionales (Jiang et al., 2023; Al-Farttoosi et al., 2025).

4.4. Influencia de la microestructura

Las propiedades mecánicas están directamente relacionadas con la porosidad, la distribución de los productos de hidratación y la calidad de la ITZ. En concretos con agregados reciclados, el mortero adherido genera una estructura heterogénea y porosa con múltiples ITZ, las cuales actúan como zonas débiles donde se inician microfisuras (Xiao et al., 2019; Zhang et al., 2024).

Para contrarrestar este efecto, los nanomateriales (nanosílice, GO y CNT) densifican la matriz y refinan la ITZ, lo que reduce la porosidad y favorece la formación de geles más estables (Mukharjee & Barai, 2014; Wang et al., 2023; Alam et al., 2025). Técnicas como la impregnación al vacío o la carbonatación de agregados reciclados también mejoran la interfaz y la durabilidad (Guo et al., 2024).

Tabla 1. *Comparación del efecto de materiales sustentables en propiedades mecánicas del concreto.*

Tipo de material	Material específico	Porcentaje de sustitución típico	Resistencia a la compresión	Resistencia a la tracción	Módulo de elasticidad	Mecanismo principal	Observaciones clave	Referencia
RCD (agregados reciclados)	Agregado grueso reciclado (RCA)	20–50%	Disminución moderada (5–25%)	Disminución moderada	Reducción	Alta porosidad y mortero adherido	Afecta la ITZ; requiere tratamiento o combinación con SCM	Silva et al., 2022; Akbulut et al., 2025
RCD (alto contenido)	RCA (>50%)	50–100%	Disminución significativa (>25%)	Disminución notable	Baja rigidez	Incremento de vacíos y heterogeneidad	Limitado para uso estructural sin mejora	Akbulut et al., 2025
Subproductos industriales	Ceniza volante / escoria	10–30% (cemento)	Mejora o estabilidad	Ligera mejora	Mejora	Reacción puzolánica (formación C-S-H)	Mejora durabilidad y compensa debilidad de RCA	Thomas et al., 2022
Subproductos agrícolas	Ceniza de cáscara de arroz (RHA)	5–20% (cemento)	Mejora (hasta 15%)	Mejora moderada	Ligero aumento	Alta sílice amorfa → densificación de matriz	Compensa pérdida de resistencia por RCA	Suomie et al., 2025
Nanomateriales	Nano sílice (SiO_2)	1–3%	Mejora significativa	Mejora	Mejora	Efecto relleno + nucleación	Refina poros y acelera hidratación	Li et al., 2022
Nanomateriales avanzados	Óxido de grafeno / CNT	<1%	Alta mejora	Mejora notable	Mejora	Refuerzo a nano escala	Mejora ITZ en concretos reciclados	Zhang et al., 2023; Lu et al., 2024
Sistema híbrido	RCA + SCM (RHA, FA)	RCA (30–50%) + SCM (10–20%)	Estabilidad o mejora	Estable	Mejora	Compensación micro estructural	Estrategia más eficiente actualmente	Suomie et al., 2025; Thomas et al., 2022
Sistema híbrido avanzado	RCA + nano + SCM	Multi componente	Mejora global	Mejora	Mejora	Sinergia multi escala	Tendencia actual en investigación	Zhang et al., 2023

5. Durabilidad del concreto sustentable

La durabilidad del concreto sustentable es esencial para su viabilidad técnica y su aporte a la economía circular. Si bien los agregados reciclados (RCA) reducen la huella de carbono y el consumo de recursos naturales, su alta porosidad y el mortero adherido en la zona de transición interfacial (ITZ) aumentan la carbonatación y la penetración de cloruros en comparación con el concreto convencional, comprometiendo la vida útil en ambientes marinos o agresivos (Silva et al., 2023).

Diversas estrategias mitigan estas deficiencias: los tratamientos superficiales y la carbonatación acelerada de los RCA densifican la microestructura y reducen la porosidad, mejorando la resistencia química y al hielo-deshielo (Guo et al., 2024). Los SCM, como ceniza volante y escoria, refinan la porosidad y forman geles más estables, protegiendo frente a ataques combinados de sulfatos y ciclos de congelación-descongelación (Hakeem et al., 2024; Zaid et al., 2023).

Los nanomateriales (nanosílice y CNT) reducen los coeficientes de difusión de cloruros mediante la densificación matricial (Yang et al., 2023; Alam et al., 2025). Los concretos geopoliméricos exhiben un desempeño superior en entornos ácidos y sulfatados debido a la estabilidad de su matriz aluminosilicada (Zaid et al., 2023; Hakeem et al., 2024). Además, las tecnologías de autocuración bacteriana favorecen la biomineralización de carbonato de calcio, las cuales sellan fisuras y reducen la permeabilidad (Zheng et al., 2024).

En conjunto, los concretos sustentables pueden alcanzar durabilidades comparables o superiores a las del concreto tradicional si se implementan estrategias de modificación microestructural y tratamiento de agregados.

5.1. Permeabilidad y absorción

La carbonatación acelerada de los RCA reduce la absorción hasta en un 48% mediante la precipitación de $CaCO_3$ en los poros, mejorando la compacidad y la ITZ (Xian et al., 2024; Liang et al., 2024). Los SCM (ceniza volante y escoria en proporciones del 20–30%) disminuyen la permeabilidad hasta un 41% por efecto de llenado y reacciones puzolánicas (Gautam et al., 2024; Sharma et al., 2023).

La nanosílice (~2%) reduce la absorción capilar entre un 55% y un 67%, y la permeabilidad al agua hasta un 71%, refinando el tamaño de poro (Gao et al., 2023; Yang et al., 2023). Las bacterias encapsuladas del género Bacillus permiten reducciones de absorción del 68–82% mediante la precipitación de calcita (Zheng et al., 2024; Park et al., 2024).

Si bien estas reducciones muestran una tendencia favorable, su magnitud depende de la absorción inicial y calidad del agregado reciclado, el porcentaje de sustitución, la dosificación y dispersión de los materiales, las condiciones de curado y el método utilizado para evaluar el transporte de agua. Por ello, los porcentajes reportados representan resultados alcanzados bajo condiciones experimentales específicas y no valores directamente transferibles a cualquier dosificación de concreto.

5.2. Carbonatación

La carbonatación reduce el pH (de ~12.5 a 8-9), desestabilizando la capa pasiva del acero y favoreciendo la corrosión. En concretos con RCA, la mayor porosidad y el mortero adherido aceleran el avance del frente de carbonatación.

El pretratamiento por carbonatación de los RCA densifica la ITZ y reduce la penetración de CO_2 (Zhang et al., 2024). Los SCM (ceniza volante, escoria y humo de sílice) refinan la red porosa y forman productos de hidratación secundarios, compensando la pérdida de resistencia asociada al RCA (Zong & Wang, 2024).

Además, la carbonatación de materiales reciclados se consolida como una tecnología de captura y utilización de carbono, pudiendo alcanzar balances de carbono favorables, aunque persisten desafíos relacionados con variabilidad, escalabilidad y aprovechamiento de CO_2 diluido (Srivastava & Singh, 2025). La combinación de agregados recarbonatados, cementos de bajo clínker y curado con CO_2 representa una línea prometedora.

5.3. Penetración de cloruros y corrosión

En concretos con RCA, el mortero adherido y la ITZ porosa aumentan el coeficiente de difusión de cloruros hasta un 43% respecto al concreto convencional (Ortolan et al., 2023).

Los SCM, como metacaolín, humo de sílice y ceniza volante, mejoran la resistencia a la penetración de cloruros. Con 100% de RCA, el metacaolín redujo el coeficiente de difusión hasta un 84.6% e incrementó la resistividad eléctrica (Peixoto et al., 2024).

La nanosílice, el TiO_2 y el GO refinan la microestructura y mejoran la ITZ, reduciendo la difusión iónica (Zhao, 2023; Zhang et al., 2024). Los sistemas de autocuración y los tratamientos superficiales hidrofóbicos también disminuyen la penetración de cloruros (Takada & Abe, 2023).

No obstante, esta reducción corresponde a una combinación específica de 100 % de agregado reciclado y metacaolín, por lo que su magnitud no puede generalizarse. El desempeño frente a cloruros también depende de la relación agua/cemento, el contenido y reactividad del material cementante suplementario, la conectividad de los poros, el curado y la concentración y duración de la exposición.

5.4. Ataque químico

El ataque químico (sulfatos, ácidos y agua de mar) deteriora el concreto sustentable. En los concretos con agregados reciclados (RAC, por sus siglas en inglés Recycled Aggregate Concrete), la mayor porosidad y la ITZ vulnerable aceleran estos procesos. Además, el mortero adherido puede contener sulfatos residuales que favorecen el deterioro interno (Gao et al., 2023).

La ceniza volante reduce la conectividad porosa y limita el transporte de sulfatos mediante reacciones puzolánicas (Gao et al., 2023). El ataque con ácido sulfúrico disuelve la portlandita y lixivia compuestos cementicios; residuos cerámicos y nanopartículas de sílice derivadas de vidrio reciclado mejoran la resistencia química, reduciendo pérdidas de resistencia, masa y velocidad ultrasónica tras exposiciones prolongadas (Ashraf et al., 2025).

Los geopolímeros presentan un desempeño superior frente a ácidos y sulfatos gracias a su matriz aluminosilicada más estable (Hasanah et al., 2024). Aunque los concretos con RCA son más susceptibles al ataque químico, el uso de SCM,

geopolímeros y nanomateriales mejora significativamente su resistencia en estos entornos.

5.5. Síntesis de durabilidad

La evidencia muestra que la durabilidad del concreto sustentable con RCA es un desafío superable mediante modificaciones microestructurales. La vulnerabilidad frente a agentes agresivos proviene de la alta porosidad y el mortero adherido en la ITZ, que incrementan la absorción capilar (22–48%), la carbonatación (hasta 49%), la difusión de cloruros (hasta 43%) y la susceptibilidad química.

La carbonatación acelerada de los RCA reduce la absorción hasta un 48% al densificar la ITZ. Los SCM (ceniza volante, escoria, humo de sílice y metacaolín), en proporciones del 20–30%, disminuyen la permeabilidad hasta un 41% y el coeficiente de difusión de cloruros hasta un 85% mediante refinamiento poroso y reacciones puzolánicas. Los nanomateriales (nanosílice, TiO_2 y GO) logran reducciones del 55–67% en absorción capilar y del 71% en permeabilidad.

En conjunto, los resultados confirman que las estrategias de modificación microestructural pueden compensar parcialmente la vulnerabilidad de los concretos con agregados reciclados. Sin embargo, la dispersión de los porcentajes reportados evidencia que no existe una eficacia constante para cada tratamiento. La respuesta depende de la calidad inicial del residuo, la compatibilidad entre los componentes, la dosificación, el curado y las condiciones de exposición. Por tanto, la selección de una estrategia debe basarse en el mecanismo de deterioro predominante y no únicamente en el mayor porcentaje de mejora informado.

La autocuración bacteriana representa la estrategia más innovadora, con disminuciones de absorción del 68–82% mediante biomineralización. Los geopolímeros exhiben un desempeño superior frente a ácidos y sulfatos. En conjunto, los concretos sustentables pueden alcanzar durabilidades comparables o incluso superiores a las del concreto convencional si se combinan agregados carbonatados, SCM y sistemas de autocuración.

6. Impacto ambiental y sostenibilidad

El desarrollo de concretos sustentables busca reducir el impacto ambiental asociado con la producción de cemento Portland y el consumo de recursos naturales, como la extracción de áridos y el agua. La fabricación de concreto convencional implica altas emisiones de CO_2, principalmente debido a la producción de clínker, así como un elevado consumo energético (UNEP, 2024), así como contaminantes atmosféricos.

La incorporación de materiales reciclados, subproductos industriales y nanomateriales disminuye la huella ambiental al reducir el contenido de clínker, aprovechar residuos y mejorar el desempeño mecánico y la durabilidad, tanto en compresión como en flexión (Akbulut et al., 2025; Suomie et al., 2025). No obstante, la sostenibilidad no depende únicamente de la sustitución de materiales, sino también del transporte, procesamiento, consumo energético y vida útil estructural, y métodos de curado.

Por ello, diversos estudios destacan la necesidad de evaluaciones integrales basadas en análisis de ciclo de vida (LCA, por sus siglas en inglés Life Cycle Assessment) y desempeño a largo plazo, integrando indicadores de deterioro (Olsson et al., 2025). Tecnologías emergentes como la carbonatación acelerada de residuos cementicios y los sistemas híbridos (agregados reciclados, SCM y nanomateriales) representan alternativas prometedoras para reducir emisiones, y captura de CO_2 durante el fraguado (Rezzoug et al., 2025). Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la variabilidad de los residuos, la falta de estandarización y la limitada disponibilidad de estudios a escala real, lo que evidencia la necesidad de fortalecer criterios técnicos y ambientales para su implementación estructural.

6.1. Reducción de emisiones de CO_2

La reducción de emisiones es un objetivo central en los concretos sustentables, dado que la producción de clínker constituye una fuente importante de CO_2 antropogénico (Scrivener et al., 2021; UNEP, 2024). La sustitución parcial del cemento por SCM (ceniza volante, escoria y RHA) disminuye el contenido de clínker y las emisiones, además de mejorar la microestructura y durabilidad (Thomas et al., 2022; Suomie et al., 2025).

El uso de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) reduce la extracción de agregados naturales y la generación de residuos, aunque su impacto ambiental depende del transporte y procesamiento (Akbulut et al., 2025). Tecnologías recientes como los geopolímeros y la carbonatación acelerada de residuos cementicios muestran un alto potencial para disminuir emisiones y favorecer la captura y reutilización de CO_2 (Zaid et al., 2023).

La magnitud de la reducción depende del componente sustituido y de los procesos necesarios para acondicionar el material alternativo. La sustitución de cemento Portland suele producir un beneficio mayor que el reemplazo de agregados naturales, debido a la elevada contribución del clínker a la huella de carbono del concreto. En contraste, el empleo de agregados reciclados puede generar beneficios más relacionados con la conservación de recursos y la reducción de residuos que con una disminución directa y significativa de las emisiones. Además, operaciones como trituración, molienda, clasificación, tratamiento térmico o químico y transporte a grandes distancias pueden reducir parcialmente las ventajas obtenidas. Por ello, la disponibilidad regional, el grado de procesamiento y la distancia entre la fuente del residuo y la planta de concreto son variables determinantes para establecer el beneficio ambiental real (Akbulut et al., 2025; Olsson et al., 2025).

La literatura coincide en que la reducción efectiva requiere estrategias integrales que combinen la disminución de clínker, la valorización de residuos y la mejora de la durabilidad, destacando los sistemas híbridos como una de las alternativas más prometedoras.

6.2. Economía circular y valorización de residuos

La economía circular promueve la reincorporación de los residuos de construcción y demolición, subproductos industriales y residuos agrícolas como materias primas

secundarias, con el propósito de disminuir la extracción de recursos naturales y la disposición de materiales en vertederos. En el concreto, esta estrategia puede extender el ciclo de utilización de los materiales y reducir la dependencia de agregados naturales y clínker. Sin embargo, la incorporación de un residuo no garantiza automáticamente un beneficio ambiental, ya que su aprovechamiento puede requerir procesos de separación, trituración, molienda, lavado, secado o activación que consumen energía y agua.

La valorización debe considerar la disponibilidad local del residuo, su estabilidad química y física, el grado de procesamiento requerido y la existencia de otros usos potenciales con mayor valor ambiental. También deben evitarse asignaciones dobles de beneficios, por ejemplo, atribuir simultáneamente al concreto toda la reducción asociada con la disposición evitada y con la sustitución de materias primas vírgenes. La calidad y trazabilidad de los residuos son igualmente relevantes, debido a que la presencia de contaminantes o la variabilidad entre lotes puede comprometer el desempeño y limitar su utilización a gran escala.

Desde una perspectiva de circularidad, las alternativas más favorables son aquellas que utilizan materiales disponibles regionalmente, requieren un procesamiento limitado, mantienen o prolongan la vida útil del concreto y permiten su posterior reciclaje. En consecuencia, la valorización debe evaluarse no solo por la cantidad de residuo incorporado, sino también por la reducción efectiva del consumo de recursos, las cargas ambientales evitadas y el desempeño alcanzado durante la vida útil.

6.3. Análisis de ciclo de vida (LCA)

El LCA se ha convertido en una herramienta fundamental para evaluar la sostenibilidad de los concretos sustentables, abarcando desde la extracción de materias primas hasta la disposición final (Olsson et al., 2025). Diversos estudios demuestran que la incorporación de agregados reciclados y SCM puede reducir significativamente las emisiones de CO_2 y el consumo energético en comparación con concretos convencionales, especialmente cuando se utilizan residuos de origen local y se disminuye el contenido de clínker (Thomas et al., 2022; Akbulut et al., 2025).

Para que la comparación ambiental entre concretos convencionales y sustentables sea confiable, el LCA debe definir claramente el objetivo y alcance del estudio, la unidad funcional y los límites del sistema. La unidad funcional debe considerar un volumen equivalente de concreto con prestaciones mecánicas y de durabilidad comparables, por ejemplo, 1 m^3 de concreto que cumpla una resistencia especificada durante una vida útil determinada. Asimismo, el inventario debe incluir el consumo de materias primas, energía y agua; las distancias y medios de transporte; el procesamiento y acondicionamiento de los residuos; y, cuando corresponda, la captura de CO_2 y los beneficios asociados con la sustitución de materiales vírgenes.

Entre los indicadores de mayor relevancia se encuentran el potencial de calentamiento global, la demanda energética, el consumo de agua, el agotamiento de recursos y la generación de residuos. También deben declararse la calidad y representatividad de los datos, las reglas de asignación, los posibles créditos ambientales y los análisis de sensibilidad e incertidumbre. Estos criterios permiten evitar comparaciones basadas únicamente en el porcentaje de sustitución y valorar conjuntamente el desempeño ambiental, la durabilidad y la vida útil del concreto, conforme a los principios de las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b).

En general, el LCA permite establecer criterios confiables para comparar concretos sustentables y convencionales, favoreciendo materiales con menor huella ambiental y mayor eficiencia a largo plazo.

6.4. Limitaciones ambientales y desafíos actuales

A pesar de los beneficios, existen limitaciones que dificultan la implementación a gran escala de concretos sustentables. Los principales desafíos incluyen la variabilidad de las propiedades de los residuos, la falta de estandarización en los procesos de procesamiento y caracterización, y la ausencia de normativas específicas para muchos materiales alternativos (Akbulut et al., 2025).

Ciertos tratamientos de mejora y algunos nanomateriales pueden incrementar el consumo energético y los costos de producción, reduciendo parcialmente los beneficios ambientales esperados. Factores como el transporte, la trituración y el acondicionamiento de residuos también influyen significativamente en la huella ambiental (Olsson et al., 2025).

Otro aspecto relevante es el posible desplazamiento de impactos entre categorías. Una mezcla puede presentar una menor huella de carbono, pero requerir mayor consumo de agua, energía, aditivos químicos o transporte. De manera similar, algunos tratamientos de agregados reciclados y procesos de fabricación de nanomateriales pueden mejorar la resistencia y durabilidad, pero generar cargas ambientales adicionales durante su producción. Por tanto, la evaluación no debe limitarse a las emisiones de CO_2, sino considerar también la demanda energética, el consumo de agua, el agotamiento de recursos, la generación de residuos y, cuando exista información disponible, los efectos potenciales asociados con la toxicidad y liberación de partículas (Olsson et al., 2025; Zhang et al., 2023).

La durabilidad y la vida útil también modifican la interpretación ambiental. Un concreto con menor impacto inicial puede dejar de ser favorable si presenta deterioro prematuro y requiere reparaciones o sustituciones frecuentes. En contraste, una mezcla con una carga inicial ligeramente superior puede producir un menor impacto acumulado cuando prolonga la vida útil de la estructura y reduce las intervenciones de mantenimiento.

En consecuencia, las comparaciones ambientales deben realizarse entre concretos que proporcionen prestaciones mecánicas y durables equivalentes durante un periodo de servicio definido, y no únicamente entre mezclas con diferentes porcentajes de sustitución.

Por ello, diversos autores coinciden en la necesidad de fortalecer las metodologías de evaluación ambiental, los análisis de ciclo de vida y los criterios de diseño basados en desempeño, para garantizar aplicaciones más confiables y sostenibles en infraestructura y construcción (Thomas et al., 2022; Zhang et al., 2023).

6.5. Síntesis crítica e integración de resultados

En conjunto, los resultados muestran una tendencia favorable hacia el uso de materiales reciclados y subproductos industriales en la producción de concretos con menor impacto ambiental. Sin embargo, la magnitud de los beneficios mecánicos, durables y ambientales no depende únicamente del porcentaje de sustitución, sino también del origen y variabilidad del residuo, su composición química y mineralógica, granulometría, porosidad, absorción de agua, tratamiento previo y compatibilidad con la matriz cementante. Por ello, materiales clasificados dentro de una misma categoría pueden producir comportamientos diferentes y no deben considerarse equivalentes sin una caracterización previa.

En los concretos con agregados reciclados, la evidencia indica que los niveles moderados de sustitución pueden conservar un desempeño mecánico aceptable y reducir el consumo de agregados naturales. No obstante, el efecto depende de la cantidad y calidad del mortero adherido, la absorción del agregado, la relación agua/cemento y las condiciones de curado. A porcentajes elevados de reemplazo, el incremento de la porosidad y el debilitamiento de la zona de transición interfacial pueden reducir la resistencia y favorecer el transporte de agentes agresivos. En consecuencia, los beneficios asociados con el aprovechamiento de residuos deben contrastarse con las posibles reducciones de durabilidad y vida útil (Silva et al., 2022; Akbulut et al., 2025).

Los materiales cementantes suplementarios y los subproductos industriales presentan, en general, una tendencia favorable debido a su capacidad para disminuir el contenido de clínker y refinar progresivamente la microestructura. Sin embargo, su eficiencia está condicionada por la finura, el contenido de fases amorfas, la actividad puzolánica, el porcentaje de sustitución y el tiempo de curado. Una sustitución elevada con materiales de baja reactividad puede generar un efecto de dilución y reducir la resistencia a edades tempranas, mientras que una dosificación adecuada y un curado suficiente pueden favorecer el desarrollo posterior de productos cementantes y mejorar la durabilidad. Por tanto, la condición de residuo o subproducto no garantiza por sí misma un mejor desempeño ambiental o técnico (Thomas et al., 2022; Suomie et al., 2025).

En el caso de los nanomateriales, los estudios reportan mejoras potenciales en la densificación de la matriz, la zona de transición interfacial y las propiedades de transporte. No obstante, la magnitud del efecto depende especialmente de la dosificación, dispersión, superficie específica y compatibilidad con los aditivos químicos. Las dosificaciones reducidas y adecuadamente dispersadas tienden a producir mejores resultados, mientras que la aglomeración puede generar zonas débiles, pérdida de trabajabilidad y un consumo adicional de agua o superplastificante. Además, los beneficios mecánicos deben evaluarse junto con la energía de producción, el costo y los posibles impactos ambientales de estos materiales (Zhang et al., 2023; Olsson et al., 2025).

Los sistemas híbridos muestran el mayor potencial porque permiten compensar las limitaciones de un material mediante las propiedades de otro; por ejemplo, los materiales cementantes suplementarios pueden refinar la matriz de concretos con agregados reciclados, mientras que los nanomateriales pueden mejorar la zona de transición interfacial. Sin embargo, no existe una combinación universalmente óptima. Su desempeño depende de la compatibilidad entre los componentes, la dosificación, el método de mezclado, el curado y las condiciones de exposición. Asimismo, el incremento de resistencia no debe interpretarse automáticamente como mayor sostenibilidad, ya que algunos tratamientos y nanomateriales pueden aumentar el consumo energético y la huella ambiental (Rezzoug et al., 2025; Olsson et al., 2025).

En consecuencia, la evidencia disponible no permite establecer porcentajes de sustitución aplicables de manera general. La selección de los materiales debe realizarse mediante criterios basados en desempeño, considerando conjuntamente resistencia, durabilidad, disponibilidad local, transporte, procesamiento y vida útil. Las diferencias entre procedimientos experimentales, edades de ensayo y condiciones de exposición también limitan la comparación directa entre estudios. Se requiere, por tanto, una mayor estandarización de los métodos de caracterización y evaluación para trasladar los resultados de laboratorio a aplicaciones constructivas confiables.

7. Retos y perspectivas futuras

A pesar de los avances, persisten dificultades técnicas, ambientales y normativas que limitan la aplicación generalizada de concretos sustentables en infraestructura y construcción estructural. Un reto principal es la variabilidad de los materiales reciclados y subproductos industriales: las diferencias en composición, granulometría e impurezas afectan significativamente el desempeño mecánico y la durabilidad (Akbulut et al., 2025). La falta de metodologías estandarizadas para el procesamiento, caracterización y diseño de mezclas con materiales alternativos continúa siendo una limitante importante para la implementación a escala industrial.

8. Conclusiones

La literatura analizada confirma que los materiales reciclados, los subproductos industriales y agrícolas, los materiales de origen natural o volcánico y los nanomateriales pueden contribuir al desarrollo de concretos con menor consumo de recursos naturales y menor impacto ambiental. Sin embargo, su incorporación no produce beneficios uniformes. El comportamiento depende del origen, composición, granulometría, porosidad y reactividad del material, así como del porcentaje de sustitución, la relación agua/cemento, el método de mezclado y las condiciones de curado.

Los agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición ofrecen beneficios relacionados principalmente con la conservación de agregados naturales y la reducción de residuos. No obstante, el mortero adherido, la elevada absorción y la mayor porosidad pueden disminuir la resistencia y la durabilidad, especialmente con porcentajes elevados de sustitución. Los materiales cementantes suplementarios pueden compensar parcialmente estas deficiencias mediante el refinamiento de la matriz y la reducción del contenido de clínker, aunque su eficiencia está condicionada por su composición, finura, actividad puzolánica y tiempo de curado.

Los nanomateriales presentan un alto potencial para densificar la matriz cementante y mejorar la zona de transición

interfacial, pero su eficacia depende de dosificaciones reducidas y de una dispersión adecuada. Los contenidos excesivos pueden generar aglomeración, pérdida de trabajabilidad y zonas débiles. Los sistemas híbridos que combinan agregados reciclados, materiales cementantes suplementarios y nanomateriales constituyen una de las alternativas más prometedoras, debido a que permiten actuar simultáneamente sobre la matriz, la porosidad y la interfaz. Sin embargo, no existe una combinación ni un porcentaje de sustitución universalmente óptimo.

Desde la perspectiva ambiental, la incorporación de residuos no garantiza por sí misma una mayor sostenibilidad. Los beneficios dependen de la reducción efectiva del contenido de clínker y del consumo de recursos, así como del transporte, procesamiento, demanda energética, consumo de agua, mantenimiento y vida útil. Por ello, las comparaciones deben realizarse mediante análisis de ciclo de vida con unidades funcionales y límites del sistema claramente definidos, considerando concretos con prestaciones mecánicas y durables equivalentes.

La principal limitación de la evidencia disponible es la heterogeneidad de los materiales, dosificaciones, procedimientos experimentales y condiciones de exposición, lo que dificulta la comparación directa y la formulación de criterios generales. Las investigaciones futuras deben fortalecer la caracterización y trazabilidad de los residuos, estandarizar los métodos de ensayo, evaluar el comportamiento a largo plazo y validar las mezclas a escala real. Asimismo, se requieren análisis integrados de desempeño, durabilidad, costo y ciclo de vida que permitan trasladar los resultados de laboratorio hacia aplicaciones constructivas técnicamente confiables y ambientalmente justificadas.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT (OpenAI) exclusivamente como herramienta de apoyo para la corrección gramatical y la mejora de la redacción. Todo el contenido generado o sugerido por esta herramienta fue revisado, verificado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

9. Referencias

Akbulut, Z. F., Guler, S., Yavuz, D., Avcı, M. S. (2025). Toward sustainable construction: a critical review of recycled aggregate concrete properties and future opportunities. Case Studies in Construction Materials 23, e05133. doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05133

Akter, S. T., Hawas, A. (2025). Current insight on eco-friendly concrete: a review. Buildings 15, 682. doi:https://doi.org/10.3390/buildings15050682

Alam, M. S. (2025). Nano-modified sustainable concrete: microstructural enhancement and durability performance. Construction and Building Materials 487, 136912. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.136912

Al-Farttoosi, M., Li, Z., Li, L.-Y. (2025). Hybrid and optimized neural network models to estimate the elastic modulus of recycled aggregate concrete. Journal of Asian Architecture and Building Engineering 1–20. doi:https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2456047

Ali, B. (2024). Durability enhancement of recycled aggregate concrete using advanced treatment methods: a review. Journal of Building Engineering 84, 108643. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108643

Ashraf, M. (2025). Acid resistance and durability performance of sustainable concrete containing ceramic waste and nano-silica. Construction and Building Materials 494, 138021. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.138021

Baki, V. A., Patapas, A., Petit, C., Stafford, J., Matar, O. K., Kia, A. (2026). Mechanochemical pre-treatment of recycled concrete fines for enhanced carbon capture and performance in FLG-integrated LC3 blends. Construction and Building Materials 517, 141273. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.141273

Ferrari, R. (2015). Writing narrative style literature reviews. Medical Writing 24, 230–235. doi:https://doi.org/10.1179/2047480615Z.000000000329

Gao, X. (2023). Sulfate resistance and permeability performance of recycled aggregate concrete incorporating nano-silica. Construction and Building Materials 382, 131247. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131247

Gautam, B. (2024). Influence of supplementary cementitious materials on permeability and durability performance of recycled aggregate concrete. Materials Today Communications 39, 108462. doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108462

Golafshani, E., Eftekhar Afzali, S. A., Chiniforush, A. A., Ngo, T. (2024). Using ensemble machine learning and metaheuristic optimization for modelling the elastic modulus of geopolymer concrete. Cleaner Materials 13, 100258. doi:https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100258

Guo, Y. (2024). Surface treatment technologies for recycled aggregate concrete: a review. Journal of Building Engineering 82, 108328. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108328

Hakeem, I. (2024). Durability performance of geopolymer recycled aggregate concrete under sulfate and freeze–thaw environments. Construction and Building Materials 474, 137122. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137122

ISO. (2006a). Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework (ISO 14040:2006). International Organization for Standardization.

ISO. (2006b). Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines (ISO 14044:2006). International Organization for Standardization.

Jiang, Y., Li, Z., Cheng, S. (2023). Development of unified elastic modulus model of natural and recycled aggregate concrete for structural applications. Case Studies in Construction Materials 18, e01900. doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e01900

Kabadzha, A. S., Pekrioğlu Balkis, A., Damdelen, Ö. (2026). The use of granulated recycled plastic and sludge ash as partial replacement in concrete mixes. Construction and Building Materials 506, 140215. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140215

Khan, M. M. (2024). The effect of hybrid basalt fibres on the mechanical and structural characteristics of geopolymer concrete containing geopolymer-coated recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials 447, 138115. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138115

Kovacs, R., Shamass, R., Limbachiya, V. (2025). Multi-recycling of different concrete products: effects on recycled aggregate physical characteristics and compressive strength. Journal of Building Engineering 96, 110823. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.110823

Li, X. (2024). Bio-inspired widening concrete using cellulose nanofiber to enhance multiscale fiber–matrix interface. Journal of Materials Research and Technology 33, 6223–6233. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.015

Li, Z., Zhang, Y., Shi, C. (2022). Effects of nano-silica on properties of concrete: a review. Construction and Building Materials 344, 128142. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128142

Liang, J. (2024). Accelerated carbonation treatment of recycled aggregates for improving concrete durability. Case Studies in Construction Materials 21, e04126. doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e04126

Lima, P. R. L., Barros, J. A. O., Roque, A. B., Fontes, C. M. A., Lima, J. M. F. (2017). Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete. Construction and Building Materials 149, 837–848. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.048

Lu, D., Qu, F., Punetha, P., Zeng, X., Luo, Z., Li, W. (2024). Graphene oxide nano-engineered recycled aggregate concrete for sustainable construction: a critical review. Developments in the Built Environment 18, 100248. doi:https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100248

Lv, C. (2023). A review of recent developments in application of plant fibers as reinforcements in concrete. Journal of Cleaner Production 419, 138265. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138265

Marandi, N., Shirzad, S. (2025). Sustainable cement and concrete technologies: a review of materials and processes for carbon reduction. Innovative Infrastructure Solutions 10, 72. doi:https://doi.org/10.1007/s41062-025-01544-z

Motloq, R. F. (2024). Possibility of production high strength lightweight concrete containing organic waste aggregate and recycled steel fibers. Open Engineering 14. doi:https://doi.org/10.1515/eng-2022-0584

Mukharjee, B. B., Barai, S. V. (2014). Influence of nano-silica on the properties of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 55, 29–37. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.003

Olsson, N. (2025). Life cycle assessment of sustainable recycled aggregate concrete: environmental impacts and future perspectives. Journal of Cleaner Production 472, 143512. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.143512

Ortolan, T. L. P. (2023). Chloride diffusion and durability performance of recycled aggregate concrete: a review. Construction and Building Materials 363, 129883. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129883

Park, S. (2024). Bacterial self-healing concrete: recent advances in permeability reduction and crack repair. Materials 17, 912. doi:https://doi.org/10.3390/ma17040912

Peixoto, R. (2024). Metakaolin-modified recycled aggregate concrete exposed to chloride attack. Journal of Building Engineering 84, 108575. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108575

Peng, M. (2025). Engineering properties of sustainable high strength lightweight concrete with recycled fibers. Construction and Building Materials 498, 138036. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.138036

Rezaei, F. (2023). Mechanical features and durability of concrete incorporating recycled coarse aggregate and nano-silica: experimental study, prediction, and optimization. Journal of Building Engineering 72, 106715. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106715

Rezzoug, A., AlAteah, A. H., Alahmari, T. S., Mostafa, S. A. (2025). Sustainable ultra-high-performance basalt fiber-reinforced geopolymer concrete incorporating carbon nanotubes and treated recycled aggregates. Case Studies in Construction Materials 23, e05202. doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05202

Sharma, A. (2023). Durability and transport properties of recycled aggregate concrete containing fly ash and slag. Construction and Building Materials 370, 130729. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130729

Silva, R. V., de Brito, J., Dhir, R. K. (2022). Use of recycled aggregates in concrete: a review. Construction and Building Materials 337, 127616. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127616

Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. Journal of Business Research 104, 333–339. doi:https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039

Srivastava, A., Singh, B. (2025). Carbon capture and utilization in sustainable cementitious materials: a review. Journal of CO_2 Utilization 83, 102894. doi:https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.102894

Suomie, R. W., Mishra, B. P., Das, S. (2025). Performance of rice husk ash (RHA) and recycled coarse aggregate (RCA) for sustainable concrete: a review. Next Materials 8, 100778. doi:https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2025.100778

Takada, K., Abe, T. (2023). Hydrophobic surface treatment for enhancing chloride resistance of recycled aggregate concrete. Materials Today Communications 37, 107221. doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107221

Thomas, M. D. A., Ideker, J., Juenger, M. (2022). Supplementary cementing materials in concrete: durability and performance. Cement and Concrete Research 152, 106680. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106680

UNEP. (2024). Global status report for buildings and construction 2024. United Nations Environment Programme.

Wang, Y. (2023). Nano-engineered recycled aggregate concrete: microstructure and mechanical properties. Construction and Building Materials 382, 131385. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131385

Xian, G. (2024). Carbonation treatment effects on recycled aggregate concrete durability. Journal of Building Engineering 83, 108466. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108466

Xiao, J., Li, W., Fan, Y., Huang, X. (2019). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). Construction and Building Materials 31, 364–383. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074

Yang, K. (2023). Influence of nano-silica on permeability and chloride resistance of recycled aggregate concrete. Construction and Building Materials 381, 131148. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131148

Yasin, G. (2024). Mechanical and elastic performance of sustainable recycled aggregate concrete containing supplementary cementitious materials. Materials Today Communications 38, 107914. doi:https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.107914

Zaid, O. (2023). Durability performance of geopolymer concrete incorporating industrial by-products: a review. Materials Today Sustainability 22, 100338. doi:https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100338

Zhang, P., Li, Q., Chen, Y. (2023). Nanomaterials in cement-based composites: a review. Materials 16, 1434. doi:https://doi.org/10.3390/ma16041434

Zhao, H. (2023). Nano-engineered recycled aggregate concrete with enhanced chloride resistance. Journal of Building Engineering 74, 106943. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106943

Zheng, X. (2024). Self-healing bacterial concrete for durability enhancement: mechanisms and engineering applications. Construction and Building Materials 460, 136319. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136319

Zhou, X. (2024). Durability assessment of recycled aggregate concrete exposed to carbonation and chloride environments. Journal of Building Engineering 86, 108992. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108992

Zou, X. (2024). Water absorption and permeability characteristics of recycled aggregate concrete under different curing conditions. Construction and Building Materials 405, 133978. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133978