

Mechanical Properties of Ecological Concrete Made with Steel Slag and Seashells: A Systematic Literature Review

Saul Andrés Huamani-Sánchez[✉]; Helard Gustavo Salcedo-Apaza[✉]; Gerson José Márquez[✉]
Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u18103329@utp.edu.pe, u20201270@utp.edu.pe, gmarquez@utp.edu.pe

Abstract– Concrete is an essential material in construction worldwide; however, its production entails a significant carbon footprint. A viable strategy to mitigate this environmental impact is the development of sustainable concretes through the partial replacement of cement or aggregates with natural waste or industrial by-products. This Systematic Literature Review analyzes the effect of steel slag and seashells on the mechanical properties of concrete incorporating these residues. The literature search, based on the PICO methodology, was conducted in the Scopus, EBSCOhost, and Scilit databases, identifying 2,384 sources. After applying the eligibility criteria in accordance with the PRISMA statement, 62 relevant articles were selected. The results indicate that steel slag is mainly used in ultra-high performance concretes, while seashells are more frequently applied in cellular concretes. Both residues proved effective in improving mechanical properties. Compressive strength ranged from 24.8 MPa to 206.9 MPa, with the highest value achieved by replacing 100% of the fine aggregate with steel slag. A tensile strength of up to 10.5 MPa was also reported in mixtures with slag as fine aggregate. Seashells significantly contributed to improving concrete strength and durability, in addition to reducing cracking. In conclusion, although the benefits of steel slag in eco-friendly concretes are well documented, further research is needed to explore the potential of seashells and the development of combined formulations that harness possible synergistic effects in sustainable concrete production.

Keywords– Ecological concrete, steel slag, seashells, mechanical properties, compressive strength.

Propiedades Mecánicas del Hormigón Ecológico Elaborado con Escoria Siderúrgica y Conchas Marinas: Una Revisión Sistemática de Literatura

Saul Andrés Huamani-Sánchez[✉]; Helard Gustavo Salcedo-Apaza[✉]; Gerson José Márquez[✉]
Universidad Tecnológica del Perú, Perú, u18103329@utp.edu.pe, u20201270@utp.edu.pe, gmarquez@utp.edu.pe

Resumen– *El hormigón es un material esencial en la construcción a nivel mundial; sin embargo, su producción conlleva una elevada huella de carbono. Una estrategia viable para mitigar este impacto ambiental es el desarrollo de hormigones sostenibles mediante la sustitución parcial del cemento o los agregados por residuos naturales o subproductos industriales. Esta Revisión Sistemática de Literatura analiza el efecto de la escoria siderúrgica y las conchas marinas sobre las propiedades mecánicas del hormigón elaborado con dichos residuos. La búsqueda bibliográfica, basada en la metodología PICO, se llevó a cabo en las bases de datos Scopus, EBSCOhost y Scilit, identificando 2384 fuentes. Tras aplicar los criterios de elegibilidad conforme a la declaración PRISMA, se seleccionaron 62 artículos relevantes. Los resultados indican que la escoria siderúrgica se emplea principalmente en hormigones de ultra alto rendimiento, mientras que las conchas marinas se utilizan con mayor frecuencia en hormigones celulares. Ambos residuos demostraron ser eficaces en la mejora de propiedades mecánicas. La resistencia a la compresión varió entre 24,8 MPa y 206,9 MPa, alcanzándose el valor máximo al sustituir el 100 % del agregado fino por escoria siderúrgica. También se reportó una resistencia a la tracción de hasta 10,5 MPa con escoria. Las conchas marinas contribuyeron significativamente a la resistencia y durabilidad del hormigón, además de reducir la fisuración. En conclusión, si bien los beneficios de la escoria siderúrgica están ampliamente documentados, se requiere mayor investigación sobre el potencial de las conchas marinas y sobre formulaciones combinadas que permitan aprovechar efectos sinérgicos en hormigones sostenibles.*

Palabras clave– *Hormigón ecológico, escoria siderúrgica, concha marina, propiedades mecánicas, resistencia a la compresión.*

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el acelerado crecimiento demográfico y económico ha impulsado un desarrollo urbano intensivo, lo que ha generado un notable incremento en las actividades de construcción. Este fenómeno ha contribuido significativamente al aumento de la huella de carbono, provocando efectos adversos sobre los ecosistemas y la salud de los seres vivos [1]. Como resultado de la expansión de nuevos proyectos de infraestructura, las empresas del sector construcción enfrentan una creciente demanda de insumos, motivada por la necesidad de materiales esenciales como el yeso, el cemento y el hormigón, indispensables para la ejecución de obras resistentes y duraderas [2].

El hormigón es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial, con una producción anual que supera los 10 mil millones de toneladas [3]. Esta elevada demanda ha llevado a la sobreexplotación de los agregados naturales, un aspecto que genera una gran preocupación debido a la utilización insostenible de los recursos, la cual no se realiza de manera equilibrada [4]. En este contexto, la búsqueda de alternativas sostenibles se ha convertido en una necesidad crucial.

El hormigón está compuesto generalmente por un 10 - 20 % de cemento, un 70 - 80 % de agregado natural y un 5 - 10 % de agua en masa [5]. El cemento, siendo uno de los componentes principales del hormigón, es también uno de los mayores responsables del impacto ambiental de esta industria, debido a la gran cantidad de dióxido de carbono (CO₂) que se emite durante su producción. En términos ambientales, la industria del cemento representa aproximadamente el 8 % de las emisiones globales de dióxido de carbono [6], con más de 0,8 toneladas de CO₂ emitidas por cada tonelada de cemento producida [7]. Por otro lado, se estima que la industria siderúrgica genera más de 200 millones de toneladas de escoria anualmente, de las cuales una parte significativa no se reutiliza de manera eficiente [8]. Asimismo, la industria pesquera produce grandes cantidades de residuos de conchas marinas, especialmente en regiones costeras, generando problemas ambientales por su lenta descomposición [9].

Frente al panorama descrito, resulta urgente que el desarrollo de la industria del hormigón se enfoque en estrategias que no solo reduzcan su impacto ambiental, sino que también promuevan la valorización de residuos industriales y biológicos en su formulación [10]. Entre las opciones exploradas para mitigar el impacto ambiental y mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, se incluye el uso de materiales como botellas de plástico PET (tereftalato de polietileno), polvo de neumático (caucho granulado), residuos de aceituna, piedra pómez, escoria siderúrgica y conchas marinas [11]–[13].

Entre los diversos residuos considerados, la escoria siderúrgica y las conchas marinas destacan por su interés. En la literatura se detalla cómo estas dos fuentes pueden mejorar las características y propiedades mecánicas del hormigón. La escoria siderúrgica, un subproducto del proceso de fundición del acero, representa entre el 12 % y el 20 % de la producción

de acero en bruto [14]. Este residuo contiene varios elementos químicos que son altamente útiles para la sustitución de materiales convencionales y la mejora de las propiedades del hormigón [15]. Los experimentos realizados en diversas investigaciones han demostrado que los agregados de escoria siderúrgica de arco eléctrico mejoran significativamente la calidad de la zona de transición interfacial en el concreto [16]. Debido a sus características, este residuo tiene el potencial de ser una valiosa solución para mitigar los desafíos ambientales que se enfrentan en la actualidad.

Entre las diversas aplicaciones prácticas de la escoria siderúrgica, se encuentra la implementación de bloques de protección de taludes, diseñados con un núcleo de escoria de acero y una carcasa de hormigón. Estos bloques se han empleado para estabilizar terrenos y mitigar la erosión en zonas como ríos y costas, destacándose como una alternativa funcional y sostenible en el ámbito de la infraestructura [15].

En segundo lugar, las conchas marinas pueden convertirse en un material valioso para mejorar las propiedades del hormigón. Estas conchas están compuestas por múltiples capas de microestructuras que poseen diversas características mecánicas, como alta resistencia y tenacidad [17]. A pesar del creciente interés en el desarrollo de hormigón ecológico, todavía existe una falta de comprensión completa sobre su efectividad y propiedades mecánicas.

En esta Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) se analiza el potencial de la escoria siderúrgica y las conchas marinas como materiales alternativos para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón utilizado en diversas aplicaciones del sector de la construcción.

Este trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II, Metodología, se describe el procedimiento metodológico seguido para el desarrollo de la RSL, desde la formulación de las preguntas de investigación hasta la selección de las fuentes de información incluidas en la revisión. En la Sección III, Resultados y Discusión, se presentan los hallazgos obtenidos tras la extracción y sistematización de la información, y se incluye un análisis comparativo de las propiedades mecánicas del hormigón ecológico elaborado con escoria siderúrgica y conchas marinas. Finalmente, en la Sección IV, Conclusiones, se resumen los principales hallazgos y limitaciones del estudio, y se proponen alternativas para futuras investigaciones sobre el tema.

II. METODOLOGÍA

Se llevó a cabo una Revisión Sistemática de la Literatura utilizando una estrategia de búsqueda estructurada conforme al método PICO. La pregunta orientadora formulada fue: ¿Cuál es la mejora en las propiedades mecánicas del hormigón que se puede lograr mediante la incorporación de escoria siderúrgica y conchas marinas?

Asimismo, se plantearon las siguientes subpreguntas de investigación con el objetivo de guiar y delimitar el alcance de la revisión:

RQ1: ¿Qué tipos de hormigón han sido estudiados con la incorporación de escoria siderúrgica y conchas marinas?

RQ2: ¿Qué proporciones de escoria siderúrgica y conchas marinas se han utilizado en la elaboración de hormigón ecológico?

RQ3: ¿Qué propiedades mecánicas se han reportado en estudios que integran escoria siderúrgica y conchas marinas en mezclas de hormigón?

La Tabla I presenta los componentes de la pregunta orientadora de la RSL, junto con las palabras clave asociadas a cada componente del esquema PICO.

La búsqueda de información se llevó a cabo en las bases de datos científicas Scopus, EBSCOhost y Scilit. Para ello, se utilizó una combinación de palabras clave presentadas en la Tabla I, aplicando la siguiente ecuación de búsqueda:

(Concrete OR "ecological concrete") AND (Oysters OR "Seashell recycling" OR "Mussel shell aggregate" OR "Marine waste utilization" OR "Senilia senilis seashells" OR "Seashell aggregate" OR Seashell OR "Marine waste" OR "Steel Slag" OR "Slag aggregate" OR "Steel slag aggregate") AND ("Mechanical properties" OR "Mechanical performance" OR "Mechanical strength" OR tensile OR compression)

Para la selección de los documentos pertinentes para el desarrollo de la RSL, se establecieron los siguientes criterios de inclusión (CI) y exclusión (CE):

CI1: Estudios que investiguen el uso de escoria siderúrgica o conchas marinas como sustitutos del cemento o de los agregados en la fabricación de hormigón ecológico.

CI2: Estudios que describan procesos, métodos o soluciones orientadas a la producción de hormigones ecológicos mediante el uso de estos materiales residuales.

CI3: Estudios que evalúen propiedades mecánicas del hormigón ecológico resultante.

CE1: Estudios exclusivamente teóricos o basados en simulaciones, sin componente experimental.

CE2: Estudios que no incluyan una evaluación de las propiedades del hormigón elaborado.

CE3: Publicaciones que no correspondan a artículos de investigación originales, que estén redactadas en idiomas distintos del inglés, o que hayan sido publicadas antes del año 2019.

TABLA I
COMPONENTES DE LA PREGUNTA ORIENTADORA DE LA RSL Y
PALABRAS CLAVE

Componente		Palabras Clave
Problema	Hormigón	Concrete, "ecological concrete"
Intervención	Escoria siderúrgica y conchas marinas como sustitutos de agregado y cemento	Oysters, "Seashell recycling", "Mussel shell aggregate", "Marine waste", "Senilia senilis seashells", "Seashell aggregate", Seashell, "Marine waste", "Steel Slag", "Slag aggregate", "Steel slag aggregate"
Resultados	Propiedades mecánicas	"Mechanical properties", "Mechanical performance", "Mechanical strength", Tensile, Compression

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La selección de las fuentes de información se realizó siguiendo el protocolo PRISMA. La Fig. 1 muestra el diagrama de flujo correspondiente, que detalla el proceso de identificación, selección y exclusión de los documentos analizados.

En una primera etapa, se identificaron estudios en tres bases de datos: Scopus (n = 1072), EBSCOhost (n = 354) y Scilit (n = 958), obteniéndose un total de 2384 registros. Posteriormente, se eliminaron 43 duplicados, y se aplicaron los criterios de exclusión, lo que resultó en la eliminación de 1916 registros: 270 por cumplir con el CE1, 63 con el CE2 y 1540 con el CE3. De este modo, se conservaron 468 artículos para la etapa de cribado.

Tras la revisión de títulos y resúmenes, se excluyeron 336 artículos por no abordar específicamente el tema de estudio. De los 132 artículos restantes, se descartaron 49 por no disponer de acceso al texto completo.

Finalmente, se evaluaron 83 artículos en texto completo, de los cuales 21 fueron excluidos tras una lectura detallada por no cumplir con los criterios de inclusión: 15 por no investigar el uso de escoria siderúrgica o conchas marinas como sustitutos del cemento o agregados (CI1), 3 por no describir métodos específicos de elaboración de hormigón ecológico (CI2) y 3 por no reportar resultados sobre propiedades mecánicas (CI3).

La revisión sistemática incluyó finalmente 62 artículos, seleccionados por su relevancia científica en el análisis de las propiedades mecánicas del hormigón ecológico elaborado con escoria siderúrgica y conchas marinas.

El hormigón es un material fundamental en la industria de la construcción. Varios autores destacan que es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial [7]. Su versatilidad lo convierte en una opción preferida en diversos contextos. El hormigón se caracteriza por tener múltiples denominaciones según su tipo, cada una con propiedades específicas adaptadas a distintas aplicaciones.

Como parte del análisis bibliográfico, se evaluó la evolución anual de los estudios incluidos en la RSL. En la Fig. 2 se presenta la evolución del número de publicaciones entre 2019 y 2023, diferenciando los estudios que emplearon escoria siderúrgica y conchas marinas.

Se observa un aumento sostenido en el volumen de investigaciones, destacando un crecimiento más acelerado a partir de 2021. La escoria siderúrgica ha sido el residuo más estudiado durante todo el período, mientras que el interés por las conchas marinas ha aumentado progresivamente, reflejando un interés emergente por su valorización en el contexto de la construcción sostenible. Esta evolución refleja la creciente preocupación ambiental del sector y la búsqueda activa de alternativas al uso de agregados y cemento convencionales.

En la literatura revisada, se han identificado diversos tipos de hormigón que incorporan escoria siderúrgica como material sustituto, siendo el hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) el más estudiado, con un 23,4% de los trabajos analizados [5], [11], [14], [16]. Otros tipos recurrentes incluyen el hormigón estructural [18], [19], el hormigón en masa [20], [21] y el hormigón autocompactante [22], [23]. En menor medida, también se reportaron estudios con hormigón de alta resistencia (HSC) [24], hormigón fino [25], refractario [26], armado [27], de alto rendimiento (HPC) [28], prefabricado [29] y permeable [30]. Esta diversidad refleja la versatilidad de la escoria como sustituto tanto de agregados como de cemento, aplicable en distintas formulaciones de hormigón.

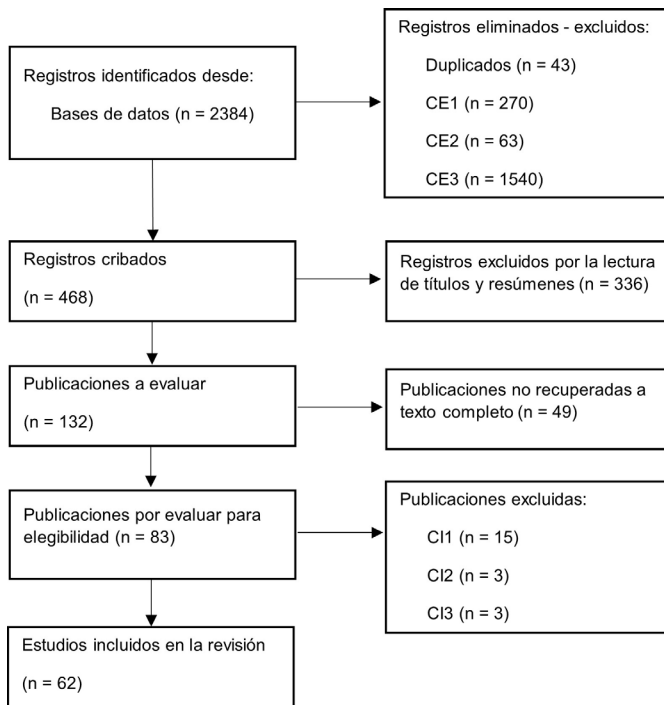


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA.

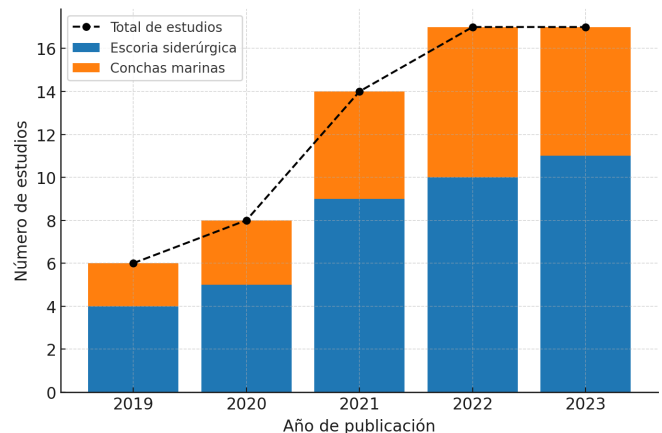


Fig. 2 Evolución del número de publicaciones sobre hormigón ecológico entre 2019 y 2023, desagregada por tipo de residuo utilizado.

Por otro lado, los estudios que emplearon conchas marinas como material alternativo se enfocaron mayoritariamente en el desarrollo de hormigón celular, que representa el 58,3 % de los trabajos identificados [31]–[37]. También se exploraron formulaciones de hormigón permeable [17], [38], autocompactante [39], poroso [40] y estructural [41], aunque con menor frecuencia. Algunos artículos no especifican el tipo de hormigón elaborado, optando por el término genérico de “hormigón sostenible” cuando el enfoque está orientado principalmente a la reducción del impacto ambiental [42], [43].

En la Fig. 3 se presenta un mapa de calor que relaciona los tipos de hormigón con el tipo de residuo utilizado. Esta visualización permite observar de manera clara cuáles combinaciones han sido más abordadas en los estudios seleccionados. Como se aprecia, el UHPC ha sido investigado principalmente en combinación con escoria siderúrgica, mientras que el hormigón celular presenta una fuerte asociación con el uso de conchas marinas. En contraste, algunos tipos de hormigón como el refractario o el prefabricado han sido evaluados únicamente con escoria, y otros como el poroso exclusivamente con conchas, lo que evidencia áreas con menor cobertura en la literatura, sugiriendo oportunidades de investigación futura, especialmente en el estudio de hormigones estructurales elaborados con conchas marinas puras o combinadas con escoria siderúrgica.

Diversos estudios han caracterizado la composición química de distintos tipos de escoria siderúrgica y conchas marinas empleadas como materiales alternativos en hormigones sostenibles. La escoria siderúrgica presenta un alto contenido de óxidos como CaO (30,4 - 49,3 %), SiO₂ (7,9 - 36,1 %), Fe₂O₃ (3,6 - 31,9 %) y MgO (1,2 - 17,6 %), cuyas proporciones varían según el tipo de horno de origen, como el horno de arco eléctrico (EAF), horno de oxígeno básico (BOF), alto horno (BFS) o el horno de optimización energética (EOF) [14], [29], [44]–[48]. Por su parte, las conchas marinas están compuestas predominantemente por carbonato de calcio (CaCO₃), con contenidos que superan el 90 % en la mayoría de los casos, lo que las convierte en una fuente rica en CaO tras su calcinación [13], [31], [37]–[39], [49]–[55]. Estas características químicas respaldan el creciente interés en el uso de ambos residuos como sustitutos parciales de agregados o cemento, debido a su aporte en la mejora de propiedades mecánicas y su potencial reactividad química.

De manera particular, una investigación identificada que explora la combinación simultánea de escoria siderúrgica y polvo de conchas de ostra en la fabricación de hormigón [41], destaca la interacción entre el carbonato de calcio de las conchas y los aluminatos presentes en la escoria, lo que da lugar a la formación de monocarboaluminato y hemicarboaluminato. Estos compuestos favorecen la densificación de la microestructura del hormigón, mejorando tanto su resistencia a la compresión como su durabilidad. Este hallazgo refuerza la viabilidad de aprovechar ambos residuos

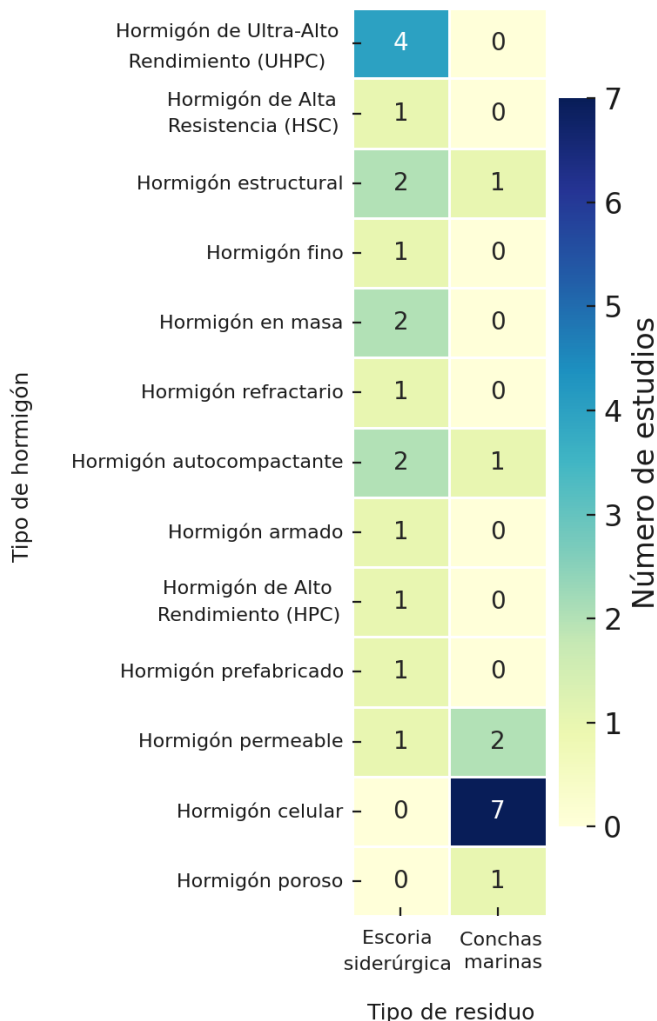


Fig. 3 Mapa de calor que muestra el número de estudios encontrados en la literatura revisada que emplean escoria siderúrgica o conchas marinas para distintos tipos de hormigón.

en conjunto para el diseño de hormigones ecológicos con alto desempeño.

La incorporación de escoria siderúrgica y conchas marinas en hormigones ha sido ampliamente investigada con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Entre los ensayos más frecuentemente reportados destacan la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción [5], [11], [31], [32], los cuales evidencian mejoras significativas en función del tipo y proporción del residuo incorporado. Adicionalmente, se han realizado ensayos de absorción de agua [32], [56]–[66], permeabilidad al agua y a iones de cloruro [19], [47], [66], [67], así como pruebas de resistencia a ciclos de congelación–descongelación [23], [44], [56], [60], abrasión [17], [61], [65], [67], ataques de sulfatos [23], [39], [46], [68] y carbonatación [23], [47], [58], [66], lo que demuestra un enfoque integral hacia la evaluación del desempeño del material. Estos estudios confirman que la sustitución parcial de agregados o cemento con residuos como

escoria y conchas no solo es viable, sino que también puede mejorar la integridad estructural y la vida útil del hormigón.

La calidad de la escoria siderúrgica y de las conchas marinas presenta variabilidad atribuible a factores como el proceso de origen y la composición química. En el caso de la escoria, su forma esférica favorece la trabajabilidad al facilitar una mezcla fluida y homogénea [5], mientras que su alto contenido de hierro incrementa la densidad del hormigón. Por su parte, las conchas marinas muestran una variabilidad dependiente de la especie [54]; su elevada porosidad puede aumentar la absorción de agua, alterando la relación agua-cemento y afectando la uniformidad de la mezcla.

En cuanto a los tipos de hormigón elaborados, la escoria siderúrgica ha sido empleada principalmente en la fabricación de hormigón de ultra alto rendimiento, alcanzando densidades de hasta 2500 kg/m^3 , superiores a las del hormigón de alto rendimiento (2100 kg/m^3) y del autocompactante (2050 kg/m^3). Este tipo de hormigón ha sido aplicado en infraestructuras de alta exigencia estructural, como puentes y edificaciones sometidas a cargas extremas. No obstante, su elevada densidad puede limitar su uso en soluciones con requerimientos térmicos. En contraste, el hormigón con conchas marinas, cuya densidad ronda los 1750 kg/m^3 , es más apropiado para elementos prefabricados y aplicaciones de aislamiento, combinando bajo peso con moderada durabilidad. Además, este material ha demostrado buena resistencia frente a iones cloruro [37], y su comportamiento varía con el porcentaje de sustitución, alcanzando niveles de reemplazo de hasta 50%. Si bien las escorias ofrecen mayor resistencia en ensayos de durabilidad, algunos estudios reportan una ligera reducción ($\sim 3,5\%$) en la resistencia a la corrosión asociada a su uso.

En conjunto, tanto la escoria siderúrgica como las conchas marinas representan alternativas viables para la producción de hormigones sostenibles. Como señala Václavík et al. [43], su utilización permite valorizar residuos industriales y marinos, contribuyendo a reducir el impacto ambiental del sector construcción.

En la Fig. 4 se muestra un diagrama de Sankey que representa las relaciones entre los residuos incorporados (escoria siderúrgica y conchas marinas), los elementos del hormigón sustituidos (agregado fino, grueso, cemento o combinaciones de estos) y los ensayos mecánicos más comúnmente realizados (compresión y tracción). Este diagrama permite detectar patrones frecuentes de combinación y destaca rutas poco exploradas, como los reemplazos dobles o triples, que podrían tener potencial para futuras investigaciones en formulaciones de hormigones sostenibles.

En la Fig. 4 se observa que la escoria siderúrgica fue usada predominantemente para reemplazar agregado grueso (17 estudios) y agregado fino (10 estudios), con algunas aplicaciones combinadas (6 estudios). En contraste, las conchas marinas fueron utilizadas principalmente como sustituto parcial de cemento (17 estudios), aunque también se emplearon en combinaciones como “cemento y agregado fino y grueso”, evidenciando un enfoque experimental más diverso.

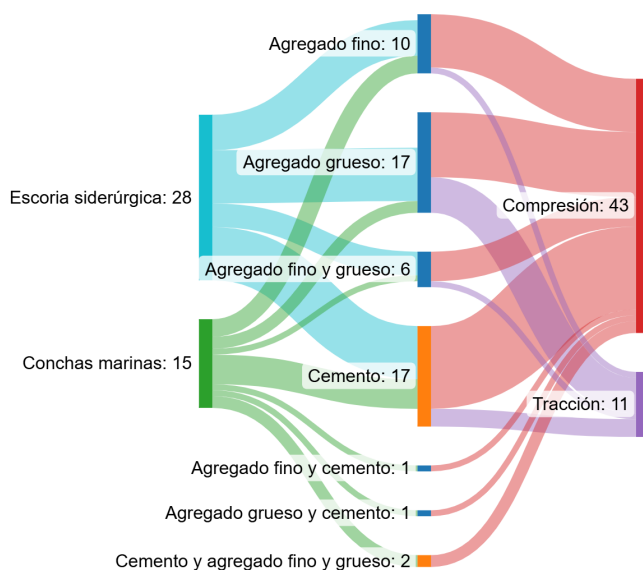


Fig. 4 Diagrama de Sankey que ilustra los flujos entre el tipo de residuo utilizado, el componente del hormigón sustituido (individual o combinado) y el tipo de ensayo aplicado en los estudios analizados.

En términos de ensayos, la resistencia a la compresión fue la prueba más recurrente (43 estudios), lo que resalta su papel clave en la validación del rendimiento estructural de las mezclas. Los ensayos de tracción (11 estudios) fueron considerablemente menos frecuentes, pero mayoritariamente asociados a mezclas donde el cemento fue parcialmente sustituido, lo cual es coherente con su impacto en la cohesión de la matriz.

Las Tablas II y III presentan los valores de resistencia a la compresión obtenidos en hormigones ecológicos elaborados con escoria siderúrgica y conchas marinas, respectivamente. Los resultados muestran una amplia variabilidad en función del tipo de residuo incorporado, la forma de aplicación (como sustituto de cemento, agregado fino o grueso), y el porcentaje de reemplazo utilizado.

Como se puede ver en la Tabla II, en el caso de la escoria siderúrgica, la mayor resistencia registrada fue de 206,9 MPa, alcanzada al reemplazar el 100% del agregado fino, según lo reportado por Kang et al. [5]. Este valor corresponde a un hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) y supera incluso a mezclas que emplean materiales avanzados como fibra de carbono, arena de sílice o nanotubos de carbono, lo que resalta el notable potencial mecánico de la escoria. Otros reemplazos completos también lograron resistencias superiores a 130 MPa [11], [44]. En contraste, las sustituciones parciales, especialmente aquellas menores al 30%, ofrecieron resistencias moderadas, entre 25 y 65 MPa, lo que sugiere que tanto el tipo como la proporción del reemplazo influyen directamente en el desempeño. Además, mezclas combinadas de escoria con otros materiales (como fibras o escorias de distintos orígenes) presentaron valores intermedios de resistencia, indicando efectos sinérgicos en el comportamiento mecánico del material.

TABLA II
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS DE HORMIGÓN
ELABORADO CON ESCORIA SIDERÚRGICA

Cantidad de residuo incorporado en la elaboración del hormigón	Resistencia a la compresión (MPa)	Referencias
100 % de escoria por agregado fino	206,9	[5]
100 % de escoria por agregado fino	157,1	[11]
45 % de escoria carbonata por cemento	133,72	[16]
20 % de escoria por cemento	25,95	[18]
70 % de escoria por agregado fino y grueso	52	[19]
15 % de escoria de alto horno y 45 % de escoria siderúrgica por cemento	50	[20]
55 % de escoria por agregado fino y grueso	41	[21]
30 % de escoria por cemento	65	[23]
100 % de escoria por agregado grueso	46,8	[24]
25 % escoria por agregado grueso	29	[25]
50 % escoria por agregado fino	36	
50 % de escoria por agregado grueso	34,1	[26]
30 % de escoria por cemento	59	[27]
50 % de escoria por agregado fino	52,2	[28]
1 % de fibra de acero por agregado fino y grueso	34	[34]
100 % de escoria por agregado grueso	39,5	[43]
100 % de escoria por agregado grueso	130,7	[44]
50 % de escoria por agregado grueso	35,39	[45]
20 % de escoria por cemento	58	[46]
100 % de escoria mixta por agregado fino	34,3	[47]
12 % de escoria por cemento	35,9	[57]
100 % de escoria por agregado grueso	46,72	[58]
30 % de escoria carbonatada por cemento	47,5	[61]
75 % de escoria por agregado grueso	45,32	[65]
100 % de escoria por agregado fino y grueso	53,7	[66]
100 % de escoria por agregado fino	46,06	[67]
50 % de escoria por cemento	52,3	[68]
30 % de escoria por agregado grueso	50,6	[69]

Por otro lado, como se observa en la Tabla III, los hormigones que incorporan conchas marinas presentaron resistencias a la compresión generalmente inferiores, aunque en algunos casos competitivas. El valor más alto fue de 66,51 MPa, obtenido con una mezcla que combina 10 % de polvo de concha de ostra y 50 % de granito fino como reemplazo de agregado fino y cemento [31]. Además, se reportaron resistencias entre 46 y 62 MPa en formulaciones que

TABLA III
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MUESTRAS DE HORMIGÓN
ELABORADO CON CONCHAS MARINAS

Cantidad de residuo incorporado en la elaboración del hormigón	Resistencia a la compresión (MPa)	Referencias
100 % de polvo conchas de ostras por agregado fino	43,6	[13]
10 % de polvo concha de ostra y 50 % granito fino por agregado fino y cemento	66,51	[31]
80 % de concha marina por agregado fino y grueso	42,3	[32]
30 % de polvo concha de ostra por cemento	46,5	[37]
50 % de <i>Senilia senilis</i> por agregado grueso	33,8	[38]
60 % de polvo de concha por cemento	62,16	[39]
20 % de polvo de concha marina por agregado fino	32,4	[40]
75 % de polvo de concha marina por agregado fino	28,86	[41]
12 % de polvo de concha por cemento	42,9	[49]
17,3 % de concha de mejillón por agregado grueso	44,88	[50]
60 %; 50 %; 20 % de ostra, berberecho y mejillón por cemento y agregado fino y grueso	25,4; 23,4; 30,1	[51]
10 % de OSP y 20 % de BFS por cemento y agregado fino y grueso	38,2	[52]
20 % de polvo concha de ostra por cemento	46,5	[54]
20 % de concha marina por agregado grueso y cemento	24,8	[55]
60 % de polvo de concha por cemento	53,8	[70]

sustituyen entre el 20 % y 60 % del cemento con polvo de conchas [37], [39], [54], [70]. Estas cifras, aunque menores que las obtenidas con escoria siderúrgica, resultan adecuadas para aplicaciones estructurales de exigencia media. Por el contrario, mezclas con niveles más altos de sustitución de agregados finos por conchas (hasta 100 %) mostraron resistencias por debajo de 45 MPa, con el valor mínimo de 24,8 MPa registrado en una combinación con 20 % de sustitución múltiple [55].

En conjunto, los resultados evidencian que la escoria siderúrgica permite alcanzar mayores resistencias a la compresión, especialmente en reemplazos completos de agregados, mientras que las conchas marinas ofrecen un rendimiento aceptable, más adecuado para hormigones no estructurales o de baja densidad. Ambos residuos muestran potencial como materiales alternativos, destacando la necesidad de ajustar la proporción y tipo de sustitución según los requerimientos específicos de resistencia. Finalmente, es importante destacar que diversos estudios coinciden en que la resistencia a la compresión mejora con el tiempo de curado, lo cual es un factor determinante para garantizar el buen desempeño mecánico de las mezclas a largo plazo.

La Tabla IV resume los valores de resistencia a la tracción obtenidos en los estudios revisados, correspondientes a hormigones que incorporan escoria siderúrgica o conchas marinas como materiales sustitutos. Los resultados reportan valores que oscilan entre 2,8 MPa y 10,5 MPa, lo que refleja una notable variabilidad influenciada tanto por el tipo de residuo como por la proporción y el componente del hormigón sustituido (agregado fino, grueso o cemento).

En el caso de la escoria siderúrgica, se identificaron los valores más altos de resistencia a la tracción. Destaca especialmente el estudio en el que se reemplazó el 100 % del agregado fino por escoria, logrando una resistencia de 10,5 MPa [11], cifra que supera ampliamente los valores obtenidos con otros residuos y que reafirma su eficacia para mejorar esta propiedad mecánica. Otros reemplazos con escoria, ya sea en el cemento o en los agregados gruesos (entre 30 % y 75 %), ofrecieron resistencias más moderadas, entre 3,3 MPa y 5,3 MPa, lo que indica que tanto el tipo de aplicación como el grado de sustitución tienen una influencia significativa en el desempeño.

En cuanto a las conchas marinas, los resultados fueron más modestos. El valor más alto fue de 7,08 MPa, registrado en una mezcla con 80 % de conchas como sustituto combinado de agregado fino y grueso [32]. En otros estudios, se utilizaron subproductos específicos como *Senilia senilis* (2,8 MPa) [38] o conchas de mejillón (3,54 MPa) [50], mientras que el reemplazo parcial del cemento con polvo de concha de ostra produjo una resistencia de 3,31 MPa [54]. Estos valores, aunque inferiores a los alcanzados con escoria, podrían ser adecuados para aplicaciones no estructurales o de baja exigencia traccional.

En síntesis, los datos analizados indican que la escoria siderúrgica ofrece un mayor potencial para mejorar la

resistencia a la tracción del hormigón, particularmente cuando se utiliza como sustituto total del agregado fino. Las conchas marinas, si bien presentan limitaciones en esta propiedad, siguen representando una opción viable en mezclas sostenibles, especialmente cuando se busca equilibrar rendimiento mecánico con beneficios ambientales.

En los estudios revisados, se identificaron diversas investigaciones que cuantifican el impacto ambiental del hormigón mediante análisis comparativos entre mezclas tradicionales y ecológicas. En particular, se ha demostrado que la sustitución parcial de materiales convencionales por residuos como escoria siderúrgica y conchas marinas permite reducir significativamente las emisiones de CO₂ asociadas a su producción [28], [52]. Por ejemplo, Liu et al. [37] reportaron una disminución del 52 % en la huella de carbono al reemplazar el 40 % del cemento por polvo de conchas de ostras, mientras que Václavík et al. [43] evidenciaron una reducción del 40 % al sustituir el 50 % del agregado grueso y fino por escoria de acero, según análisis de ciclo de vida (LCA).

El análisis de los 62 estudios incluidos en esta revisión revela que tanto la escoria siderúrgica como las conchas marinas ofrecen ventajas técnicas y ambientales frente a los materiales convencionales utilizados en la fabricación de hormigón. El hormigón con escoria puede alcanzar resistencias a la compresión superiores a 200 MPa, lo cual supera ampliamente las resistencias típicas del hormigón convencional (20 - 40 MPa) [71]. Además, presenta mayor durabilidad frente a agentes agresivos y reduce el impacto ambiental mediante la valorización de residuos industriales [72], [73]. Por su parte, aunque los hormigones con conchas marinas presentan resistencias mecánicas más moderadas, se caracterizan por su menor densidad, lo que los hace atractivos para aplicaciones donde se prioriza la ligereza estructural [33].

Ambos materiales contribuyen significativamente a la reducción del uso de recursos naturales vírgenes y a la mitigación de los problemas asociados a la disposición de residuos sólidos, en consonancia con los principios de la economía circular y los objetivos globales de descarbonización del sector construcción [74]. Este enfoque refuerza el interés en el aprovechamiento de la escoria siderúrgica y las conchas marinas para el desarrollo de hormigones ecológicos, no solo por su abundancia y potencial de reciclaje, sino también por el equilibrio que ofrecen entre rendimiento técnico y sostenibilidad ambiental.

No obstante, esta revisión también identifica limitaciones importantes. Una de ellas es la variabilidad en la composición y calidad de los residuos utilizados, lo cual afecta la comparabilidad y reproducibilidad de los resultados. Además, existe una carencia de estudios que analicen de forma integral la combinación de ambos residuos en una sola formulación de hormigón ecológico. Esta falta de investigaciones sinérgicas limita el conocimiento sobre el comportamiento conjunto de estos materiales y su potencial optimizado como insumos complementarios en el diseño de mezclas sostenibles.

Tabla IV
RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE MUESTRAS DE HORMIGÓN ELABORADO CON ESCORIA SIDERÚRGICA O CONCHAS MARINAS

Cantidad de residuo incorporado en la elaboración del hormigón	Resistencia a la tracción (MPa)	Referencias
100 % de escoria por agregado fino	10,5	[11]
50 % de escoria por agregado grueso	3,3	[26]
30 % de escoria por cemento	4,25	[27]
50 % de escoria por agregado grueso	5,3	[45]
100 % de escoria por agregado grueso	4,7	[58]
75 % de escoria por agregado grueso	3,96	[65]
50 % de escoria por cemento	4,6	[68]
80 % de concha marina por agregado fino y grueso	7,08	[32]
50 % de <i>Senilia senilis</i> por agregado grueso	2,8	[38]
17,3 % de concha de mejillón por agregado grueso	3,54	[50]
20 % de polvo concha de ostra por cemento	3,31	[54]

IV. CONCLUSIONES

En esta investigación se analizaron la escoria siderúrgica y las conchas marinas como residuos clave para el desarrollo de hormigones ecológicos con propiedades mecánicas y de durabilidad mejoradas. La incorporación de estos materiales como sustitutos parciales del cemento y los agregados ha demostrado ser efectiva para incrementar la resistencia a la compresión y la durabilidad del hormigón. Los resultados recopilados muestran que la resistencia a la compresión varió entre 24,8 MPa y 206,9 MPa, en función del tipo y proporción de residuo utilizado. La mayor mejora se obtuvo al reemplazar el 100 % del agregado fino por escoria siderúrgica, alcanzando una resistencia máxima de 206,9 MPa. Asimismo, el uso de conchas marinas contribuyó significativamente a la resistencia mecánica y durabilidad del material, mientras que la mayor resistencia a la tracción reportada fue de 10,5 MPa, también en mezclas con escoria como agregado fino.

Entre las limitaciones de esta revisión destaca la heterogeneidad metodológica de los estudios incluidos, lo que impidió la realización de comparaciones cuantitativas consistentes. Además, no se llevó a cabo un metaanálisis debido a la diversidad de diseños experimentales.

Para futuras investigaciones experimentales, se recomienda evaluar en mayor profundidad la variabilidad composicional de estos residuos y realizar estudios comparativos bajo diferentes condiciones de exposición y aplicaciones estructurales. También sería pertinente explorar formulaciones que combinen ambos materiales, con el objetivo de aprovechar posibles efectos sinérgicos.

REFERENCIAS

[1] E. Dobrucali, "Relationship between CO2 Emissions from Concrete Production and Economic Growth in 20 OECD Countries," *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2709, Aug. 2024, doi: 10.3390/buildings14092709.

[2] S. Wilkie and T. Dyer, "Mortar and Concrete: Precursors to Modern Materials," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 18, no. 9, pp. 1440–1463, Sep. 2024, doi: 10.1080/15583058.2023.2235319.

[3] E. Hache, M. Simoën, G. S. Seck, C. Bonnet, A. Jabberi, and S. Carcanague, "The impact of future power generation on cement demand: An international and regional assessment based on climate scenarios," *Int. Econ.*, vol. 163, pp. 114–133, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.inteco.2020.05.002.

[4] H. Sharma, D. K. Ashish, and S. K. Sharma, "Development of low-carbon recycled aggregate concrete using carbonation treatment and alccofine," *Energy, Ecol. Environ.*, vol. 9, no. 3, pp. 230–240, Jun. 2024, doi: 10.1007/s40974-023-00299-0.

[5] M. Kang, M.-C. Kang, A. Yonis, P. Vashistha, and S. Pyo, "Effect of steel slag on the mechanical properties and self-sensing capability of ultra-high performance concrete (UHPC)," *Dev. Built Environ.*, vol. 17, no. November 2023, p. 100342, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.dibe.2024.100342.

[6] R. M. Andrew, "Global CO2 emissions from cement production, 1928–2018," *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11, no. 4, pp. 1675–1710, Nov. 2019, doi: 10.5194/essd-11-1675-2019.

[7] V. Sousa, J. A. Bogas, S. Real, and I. Meireles, "Industrial production of recycled cement: energy consumption and carbon dioxide emission estimation," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 4, pp. 8778–8789, May 2022, doi: 10.1007/s11356-022-20887-7.

[8] W. Gao *et al.*, "Comprehensive utilization of steel slag: A review," *Powder Technol.*, vol. 422, p. 118449, May 2023, doi: 10.1016/j.powtec.2023.118449.

[9] B. Peceño, B. Alonso-Fariñas, L. F. Vilches, and C. Leiva, "Study of seashell waste recycling in fireproofing material: Technical, environmental, and economic assessment," *Sci. Total Environ.*, vol. 790, p. 148102, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148102.

[10] S. Gao, H. Chu, W. Shi, F. Wang, and J. Jiang, "Utilization of municipal solid waste incineration fly ash in ecological concrete and pavement bricks: Mechanical properties and environmental impact," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 21, p. e03999, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2024.e03999.

[11] P. Li, J. Jiang, G. Liu, and Z. Ren, "Physical, mechanical, thermal and sustainable properties of UHPC with converter steel slag aggregates," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, no. September, p. e01458, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01458.

[12] J. Vallejos, M. Montenegro, S. Muñoz, and J. García, "Mechanical and Microstructural Properties of Environmentally Friendly Concrete Partially Replacing Aggregates with Recycled Rubber and Recycled PET," *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.*, vol. 36, no. 3, pp. 94–110, Oct. 2024, doi: 10.5755/j01.sace.36.3.33836.

[13] X. Cai, R. Liu, J. Fan, and Y. Liao, "The effectiveness of waste oyster shells (WOS) as major fine aggregate replacement in concrete," *E3S Web Conf.*, vol. 261, p. 02014, May 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202126102014.

[14] Q. Cao, U. Nawaz, X. Jiang, L. Zhang, and W. S. Ansari, "Effect of air-cooled blast furnace slag aggregate on mechanical properties of ultra-high-performance concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 16, no. March, p. e01027, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01027.

[15] H. Lin, X. Yu, G. Zhang, H. Chang, and J. Liu, "Design and Interlocking Stability of Slope Protection Block of H-Type Gravity Mutual-Aid Steel Slag Core Concrete," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2019, no. 1, Jan. 2019, doi: 10.1155/2019/2932410.

[16] S. Li, G. Liu, and Q. Yu, "The role of carbonated steel slag on mechanical performance of ultra-high performance concrete containing coarse aggregates," *Constr. Build. Mater.*, vol. 307, no. August, p. 124903, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124903.

[17] M. L. M. Essalem and T. Cherradi, "Seashell as Aggregate in Cemented Materials: A Review," *Civ. Eng. Archit.*, vol. 11, no. 3, pp. 1337–1345, May 2023, doi: 10.13189/cea.2023.110318.

[18] M. Li, Y. Lu, Y. Liu, J. Chu, T. Zhang, and W. Wang, "Influence of the Steel Slag Particle Size on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete," *Sustainability*, vol. 16, no. 5, p. 2083, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16052083.

[19] A. Santamaría, V. Revilla-Cuesta, M. Skaf, and J. M. Romera, "Full-scale sustainable structural concrete containing high proportions of by-products and waste," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. May, p. e02142, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02142.

[20] T. Luo, X. Wang, and S. Zhuang, "Value-added utilization of steel slag as a hydration heat controlling material to prepare sustainable and green mass concrete," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, no. October, p. e02619, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02619.

[21] D. Kvočka, J. Šušteršič, A. Mauko Pranjić, and A. Mladenović, "Mass Concrete with EAF Steel Slag Aggregate: Workability, Strength, Temperature Rise, and Environmental Performance," *Sustainability*, vol. 14, no. 23, p. 15502, Nov. 2022, doi: 10.3390/su142315502.

[22] Adiwijaya, I. T. Datu, and Khairil, "Applicability of steel slag as replacement aggregate on characteristic of self-compacting concrete," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 871, no. 1, p. 012017, Oct. 2021, doi: 10.1088/1755-1315/871/1/012017.

[23] V. Ortega-López, F. Faleschini, C. Pellegrino, V. Revilla-Cuesta, and J. M. Manso, "Validation of slag-binder fiber-reinforced self-compacting concrete with slag aggregate under field conditions: Durability and real strength development," *Constr. Build. Mater.*, vol. 320, p. 126280, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126280.

[24] M. H. Lai, Z. H. Chen, J. Cui, J. P. Zhong, Z. R. Wu, and J. C. M. Ho, "Enhancing the post-fire behavior of steel slag normal-strength concrete by adding SCM," *Constr. Build. Mater.*, vol. 398, no. July, p. 132336, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132336.

[25] L. Es-samlali, "Natural aggregate substitution by steel slag waste for concrete manufacturing," *Int. J. GEOMATE*, vol. 26, no. 115, pp. 61–72, Mar. 2024, doi: 10.21660/2024.115.4112.

- [26] M. Alkhedr, M. Asaad, M. Ismail, and G. Wardeh, "Experimental Study on the Physical and Mechanical Characteristics of Refractory Concrete Using Heat-Treated Steel Slag Coarse Aggregates," *Infrastructures*, vol. 8, no. 10, p. 151, Oct. 2023, doi: 10.3390/infrastructures8100151.
- [27] A. Santamaría, J. M. Romera, I. Marcos, V. Revilla-Cuesta, and V. Ortega-López, "Shear strength assessment of reinforced concrete components containing EAF steel slag aggregates," *J. Build. Eng.*, vol. 46, no. October 2020, p. 103730, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jobte.2021.103730.
- [28] X. Wang, X. Wang, Y. Zhang, and Y. Fang, "Experimental Study on the Expansion Behavior of Full Aggregate Steel Slag Concrete," *J. Harbin Inst. Technol. (New Ser.)*, vol. 28, no. 1, pp. 71–84, 2021.
- [29] M. D. Rubio-Cintas, M. E. Parron-Rubio, F. Perez-Garcia, A. Bettencourt Ribeiro, and M. J. Oliveira, "Influence of Steel Slag Type on Concrete Shrinkage," *Sustainability*, vol. 13, no. 1, p. 214, Dec. 2020, doi: 10.3390/su13010214.
- [30] W. Xu, B. Chen, X. Chen, and C. Chen, "Influence of aggregate size and notch depth ratio on fracture performance of steel slag pervious concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 273, p. 122036, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122036.
- [31] M. Hadjadj, M. Guendouz, and D. Boukheikhal, "The effect of using seashells as cementitious bio-material and granite industrial waste as fine aggregate on mechanical and durability properties of green flowable sand concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 87, no. August 2023, p. 108968, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.jobte.2024.108968.
- [32] Y. Zhang *et al.*, "Study on engineering properties of foam concrete containing waste seashell," *Constr. Build. Mater.*, vol. 260, p. 119896, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119896.
- [33] A. M. Maglad, M. A. Othuman Mydin, S. Dip Datta, and B. A. Tayeh, "Assessing the mechanical, durability, thermal and microstructural properties of sea shell ash based lightweight foamed concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 402, no. July, p. 133018, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133018.
- [34] K. Luo, M. Zhang, Q. Jiang, S. Wang, and X. Zhuo, "Evaluation of using oyster shell as a complete replacement for aggregate to make eco-friendly concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 84, no. January, p. 108587, May 2024, doi: 10.1016/j.jobte.2024.108587.
- [35] Y. Han, R. Lin, and X.-Y. Wang, "Sustainable mixtures using waste oyster shell powder and slag instead of cement: Performance and multi-objective optimization design," *Constr. Build. Mater.*, vol. 348, no. December 2021, p. 128642, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128642.
- [36] Y. Zhu, D. Chen, X. Yu, R. Liu, and Y. Liao, "Properties of Cementitious Materials Utilizing Seashells as Aggregate or Cement: Prospects and Challenges," *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 5, p. 1222, Mar. 2024, doi: 10.3390/ma17051222.
- [37] S. Liu *et al.*, "Sustainable Use of Waste Oyster Shell Powders in a Ternary Supplementary Cementitious Material System for Green Concrete," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 14, p. 4886, Jul. 2022, doi: 10.3390/ma15144886.
- [38] G. O. Bamigboye, O. Okara, D. E. Basse, K. J. Jolayemi, and D. Ajimalofin, "The use of *Senilia senilis* seashells as a substitute for coarse aggregate in eco-friendly concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 32, no. June, p. 101811, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jobte.2020.101811.
- [39] M. H. Ahsan *et al.*, "Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures," *J. Build. Eng.*, vol. 50, no. January, p. 104226, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jobte.2022.104226.
- [40] J. Kong, S. Ni, C. Guo, M. Chen, and H. Quan, "Impacts from Waste Oyster Shell on the Durability and Biological Attachment of Recycled Aggregate Porous Concrete for Artificial Reef," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 17, p. 6117, Sep. 2022, doi: 10.3390/ma15176117.
- [41] Y. Han, R. Lin, and X.-Y. Wang, "Performance of sustainable concrete made from waste oyster shell powder and blast furnace slag," *J. Build. Eng.*, vol. 47, no. December 2021, p. 103918, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jobte.2021.103918.
- [42] Poonam and V. P. Singh, "Development of Sustainable Concrete from Blast Furnace Slag and Recycled Concrete Sand," *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 194–204, 2023, doi: 10.25103/jestr.164.24.
- [43] V. Václavík, M. Ondová, T. Dvorský, A. Eštoková, M. Fabiánová, and L. Gola, "Sustainability Potential Evaluation of Concrete with Steel Slag Aggregates by the LCA Method," *Sustainability*, vol. 12, no. 23, p. 9873, Nov. 2020, doi: 10.3390/su12239873.
- [44] I. Sosa, C. Thomas, J. A. Polanco, J. Setián, J. A. Sainz-Aja, and P. Tamayo, "Durability of high-performance self-compacted concrete using electric arc furnace slag aggregate and cupola slag powder," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 127, p. 104399, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104399.
- [45] H.-B. Tran, "Mechanical Properties of Coarse Aggregate Electric Arc Furnace Slag in Cement Concrete," *Civ. Eng. J.*, vol. 7, no. 10, pp. 1716–1730, Oct. 2021, doi: 10.28991/cej-2021-03091755.
- [46] A. Tahwia, A. Abd El Raheem, and A. K. Elalfy, "Use of Steel Slag in Eco-Friendly Rigid Pavement," *Bull. Fac. Eng. Mansoura Univ.*, vol. 45, no. 1, pp. 10–15, May 2020, doi: 10.21608/bfemu.2020.89166.
- [47] S.-J. Choi, Y.-U. Kim, T.-G. Oh, and B.-S. Cho, "Compressive Strength, Chloride Ion Penetrability, and Carbonation Characteristic of Concrete with Mixed Slag Aggregate," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 4, p. 940, Feb. 2020, doi: 10.3390/ma13040940.
- [48] A. Masilamani, M. Ramalingam, P. Kathirvel, G. Murali, and N. I. Vatin, "Mechanical, Physico-Chemical and Morphological Characterization of Energy Optimised Furnace (EOF) Steel Slag as Coarse Aggregate in Concrete," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 9, p. 3079, Apr. 2022, doi: 10.3390/ma15093079.
- [49] S. M. Ahmed, M. Chávez-Delgado, and S. Avudaiappan, "Experimental investigations on sustainable mortar containing recycled seashell powder as cement partial replacement," *Eng. Res. Express*, vol. 6, no. 2, p. 025101, Jun. 2024, doi: 10.1088/2631-8695/ad3717.
- [50] B. Chen, L. Peng, H. Zhong, Y. Zhao, T. Meng, and B. Zhang, "Improving the mechanical properties of mussel shell aggregate concrete by aggregate modification and mixture design," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 18, no. March, p. e02017, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02017.
- [51] G. B. Bekkeri, K. K. Shetty, and G. Nayak, "Producing of alkali-activated artificial aggregates by pelletization of fly ash, slag, and seashell powder," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 8, no. 10, p. 258, Oct. 2023, doi: 10.1007/s41062-023-01227-1.
- [52] D. Suarez-Riera, A. Merlo, L. Lavagna, R. Nisticò, and M. Pavese, "Mechanical properties of mortar containing recycled *Acanthocardia tuberculata* seashells as aggregate partial replacement," *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, vol. 60, no. 4, pp. 206–210, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.bsecv.2020.03.011.
- [53] M. O. Kim and M. K. Lee, "Strength and Microstructural Changes in Cementitious Composites Containing Waste Oyster Shell Powder," *Buildings*, vol. 13, no. 12, p. 3078, Dec. 2023, doi: 10.3390/buildings13123078.
- [54] S. Liu *et al.*, "Sustainable Utilization of Waste Oyster Shell Powders with Different Fineness Levels in a Ternary Supplementary Cementitious Material System," *Sustainability*, vol. 14, no. 10, p. 5981, May 2022, doi: 10.3390/su14105981.
- [55] B. A. Tayeh *et al.*, "Durability and mechanical properties of seashell partially-replaced cement," *J. Build. Eng.*, vol. 31, no. March, p. 101328, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.jobte.2020.101328.
- [56] X. Wen, J. Zhou, B. Chen, Z. Deng, and B. Liu, "Mechanical Performance of Steel Slag Concrete under Biaxial Compression," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 15, p. 3268, Jul. 2020, doi: 10.3390/ma13153268.
- [57] A. R. de O. Dias, F. A. Amancio, I. L. X. de Sousa, S. O. Lucas, D. A. Lima, and A. E. B. Cabral, "Efeitos da substituição do cimento Portland por escória de aciaria BSSF nas propriedades físicas e mecânicas do concreto," *Matéria (Rio Janeiro)*, vol. 25, no. 4, pp. 1–13, 2020, doi: 10.1590/s1517-707620200004.1190.
- [58] T.-T.-H. Nguyen, D.-H. Phan, H.-H. Mai, and D.-L. Nguyen, "Investigation on Compressive Characteristics of Steel-Slag Concrete," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 8, p. 1928, Apr. 2020, doi: 10.3390/ma13081928.
- [59] R. B. Tangadagi, M. Manjunatha, A. Bharath, and S. Preethi, "Utilization of steel slag as an eco-friendly material in concrete for construction," *J. Green Eng.*, vol. 10, no. 5, pp. 2408–2419, 2020.

- [60] L. Sun, H. Wang, and Y. Wang, "Properties of Carbonated Steel Slag Admixture in the Cementitious System," *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2023, pp. 1–12, Dec. 2023, doi: 10.1155/2023/5547591.
- [61] M. J. Miah, M. M. H. Patoary, S. C. Paul, A. J. Babafemi, and B. Panda, "Enhancement of Mechanical Properties and Porosity of Concrete Using Steel Slag Coarse Aggregate," *Materials (Basel)*, vol. 13, no. 12, p. 2865, Jun. 2020, doi: 10.3390/ma13122865.
- [62] M. E. Mitwally, A. Elnemr, A. Shash, and A. Babiker, "Utilization of steel slag as partial replacement for coarse aggregate in concrete," *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 9, no. 5, p. 175, May 2024, doi: 10.1007/s41062-024-01464-y.
- [63] W. Okoro and S. Oyeibisi, "Mechanical and durability assessments of steel slag-seashell powder-based geopolymer concrete," *Heliyon*, vol. 9, no. 2, p. e13188, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e13188.
- [64] Y. Xiao, P. Huang, G. Wei, L. Cui, C. Xu, and X. Du, "State-of-the-art review on performance enhancement of photovoltaic/thermal system integrated with phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 56, no. PC, p. 106073, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.106073.
- [65] A. Warudkar and S. Elavenil, "Strength and durability properties of waste steel slag mixed concrete," *Eng. Rev.*, vol. 42, no. 1, pp. 36–45, 2021, doi: 10.30765/er.1628.
- [66] P. Martauz, V. Václavík, and B. Cvopa, "The Influence of the Environment on the Properties of Hybrid Cement-Based Concrete with Steel and Air-Cooled Slags," *Crystals*, vol. 11, no. 9, p. 1087, Sep. 2021, doi: 10.3390/cryst11091087.
- [67] T. Hemalatha and B. S. Sindu, "Experimental Studies to Investigate Efficacies of Slag as Fine Aggregate Substitute," *ACI Mater. J.*, no. 117, 2020, doi: 10.14359/51725981.
- [68] K. Kathiresan and A. R. Krishnaraja, "Development of Eco Friendly Cement Concrete Using Ground Granulated Blast Furnace Slag," *Polish J. Environ. Stud.*, vol. 31, no. 4, pp. 3627–3632, Jul. 2022, doi: 10.15244/pjoes/144662.
- [69] A. Diotti, L. Cominoli, A. P. Galvin, S. Sorlini, and G. Plizzari, "Sustainable Recycling of Electric Arc Furnace Steel Slag as Aggregate in Concrete: Effects on the Environmental and Technical Performance," *Sustainability*, vol. 13, no. 2, p. 521, Jan. 2021, doi: 10.3390/su13020521.
- [70] Y. Wu, J. Lu, Y. Nie, and W. He, "Effect of seashell powder as binder material on the performance and microstructure of low-carbon sustainable alkali-activated concrete," *J. Build. Eng.*, vol. 90, no. February, p. 109442, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109442.
- [71] J. Rajprasad, J. S. Sudarsan, M. J. Prasanth, and S. Nithiyantham, "Developing low-carbon sustainable building material by adding micro steel fiber with recycled aggregate concrete," *J. Mater. Sci. Mater. Eng.*, vol. 20, no. 1, p. 26, Feb. 2025, doi: 10.1186/s40712-025-00224-9.
- [72] M. H. Lai, Z. H. Chen, Y. H. Wang, and J. C. M. Ho, "Effect of fillers on the mechanical properties and durability of steel slag concrete," *Constr. Build. Mater.*, vol. 335, p. 127495, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127495.
- [73] Q. Van Ho and T.-P. Huynh, "A comprehensive investigation on the impacts of steel slag aggregate on characteristics of high-performance concrete incorporating industrial by-products," *J. Build. Eng.*, vol. 80, p. 107982, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107982.
- [74] F. Soltanzadeh, A. E. Behbahani, E. N. B. Pereira, and C. A. Teixeira, "A Life-Cycle Approach to Integrate Environmental and Mechanical Properties of Blended Cements Containing Seashell Powder," *Sustainability*, vol. 13, no. 23, p. 13120, Nov. 2021, doi: 10.3390/su132313120.