

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	30-09-2024	C
	Dependencia	Aprobado	Pág.	
	DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO	1(88)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Johan Emiro Garzón Barbosa		
FACULTAD	Facultad de ingeniería		
PLAN DE ESTUDIOS	Maestría en Construcción		
DIRECTOR	Mgstr. Pedro Nel Angarita Uscategui		
TÍTULO DE LA TESIS	Desarrollo de una metodología integral para la evaluación de la sostenibilidad del concreto con nuevos materiales en la construcción		
TITULO EN INGLES	Development of a comprehensive methodology for evaluating the sustainability of concrete with new materials in construction		
RESUMEN (70 palabras)			
La industria de la construcción enfrenta desafíos significativos en cuanto a la durabilidad y sostenibilidad del concreto, siendo este un material fundamental en el desarrollo de infraestructuras en la construcción moderna. El cemento Portland, es el componente principal del concreto convencional, su elaboración representa entre el 7% y 8% de las emisiones globales de CO2 a la atmosfera, ya que su producción presenta un alto consumo energético con las descarbonatación del Clinker.			
RESUMEN EN INGLES			
The construction industry faces significant challenges regarding the durability and sustainability of concrete, which is a fundamental material in the development of modern construction infrastructure. Portland cement is the main component of conventional concrete. Its production accounts for between 7% and 8% of global CO2 emissions into the atmosphere, as its production is energy-intensive due to the decarbonization of clinker.			
PALABRAS CLAVES	Desarrollo, maestría, metodología, construcción.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Development, mastery, methodology, construction.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 88	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:



**Desarrollo de una metodología integral para la evaluación de la sostenibilidad del concreto
con nuevos materiales en la construcción**

Johan Emiro Garzón Barbosa

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Maestría en Construcción

Mgstr. Pedro Nel Angarita Uscategui

Agosto, 2025

Tabla de Contenido

Capítulo 1. Desarrollo de una metodología integral para la evaluación de la sostenibilidad del concreto con nuevos materiales en la construcción	6
1.1. Planteamiento del Problema	6
1.2. Formulación del Problema.....	8
1.3. Objetivos de Investigación.....	8
1.3.1. Objetivo General	8
1.3.2. Objetivos Especifico	8
1.4. Justificación	9
1.5. Delimitaciones	10
1.5.1. Delimitación Geográfica	11
1.5.2. Delimitación Temporal	11
1.5.3. Delimitación Conceptual.....	11
1.5.4. Delimitación Operativa	11
Capítulo 2. Marco referencial	13
2.1. Marco Histórico	13
2.2. Marco Contextual.....	16
2.3. Marco Conceptual	19
2.3.1. Materias primas	19

2.3.2. Sostenibilidad en la producción de concreto.....	25
2.3.3. Innovación en nuevos materiales	29
2.4. Marco Teórico.....	33
2.5. Marco Legal	35
2.5.1. Contexto internacional	35
2.5.2. Contexto nacional.....	37
Capítulo 3. Diseño Metodológico	40
3.1. Tipo de investigación.....	40
3.2 Seguimiento metodológico del proyecto	40
3.3 Población.....	43
3.4 Muestra	44
3.5 Técnicas de recolección y análisis de la información.....	44
Capítulo 4. Resultados	46
4.1 Identificación de los criterios de sostenibilidad relevantes en la evaluación de nuevos materiales para concreto, mediante el análisis de estudios científicos y normativas, con el fin de establecer una base teórica para la metodología de evaluación.....	46
4.1.1. Revisión de fuentes documentales	46
4.1.2. Criterios de evaluación.....	51
4.1.3. Matriz de criterios de evaluación	55

4.2 Desarrollo de un esquema de clasificación y análisis comparativo de los materiales innovadores en el concreto, organizando la información según variables de impacto ambiental, eficiencia estructural y durabilidad, con el fin de generar una base estructurada que facilite su evaluación.	56
4.2.1 Selección de materiales.....	57
4.2.2 Comparativa cualitativa de las propiedades mecánicas y ambientales de los materiales	59
4.2.3 Análisis comparativo	62
4.3 Diseño de una metodología de evaluación que permita analizar y comparar la sostenibilidad de materiales cementantes alternativos, integrando los criterios y esquemas de clasificación definidos, con el propósito de proporcionar una herramienta útil para la toma de decisiones en la industria de la construcción.	64
4.3.1 Enfoque metodológico	65
4.3.2 Aplicación de la metodología	67
5. Conclusiones	71
6. Recomendaciones	72
Referencias.....	73

Lista de Tablas

Tabla 1 Modelo Metodológico.....	42
Tabla 2 Matriz con los criterios de evaluación	56
Tabla 3 Matriz comparativa de criterios de sostenibilidad	61
Tabla 4 Criterios para interpretación cualitativa.....	62
Tabla 5 Distribución de porcentaje de ponderación.....	67
Tabla 6 Evaluación de sostenibilidad.....	68
Tabla 7 Resultado de evaluación final.	69

Capítulo 1. Desarrollo de una metodología integral para la evaluación de la sostenibilidad del concreto con nuevos materiales en la construcción

1.1. Planteamiento del Problema

La industria de la construcción enfrenta desafíos significativos en cuanto a la durabilidad y sostenibilidad del concreto, siendo este un material fundamental en el desarrollo de infraestructuras en la construcción moderna. El cemento Portland, es el componente principal del concreto convencional, su elaboración representa entre el 7% y 8% de las emisiones globales de CO₂ a la atmosfera, ya que su producción presenta un alto consumo energético con las descarbonatación del Clinker (Scrivener et al, 2018). Esta huella de carbono, sumando a la exposición de las condiciones ambientales que enfrentan las estructuras, acelerando su degradación, limitan su vida útil, contribuyendo a costos económicos y ambientales significativos a lo largo del ciclo de vida de las estructuras (Mehta & Monteiro, 2021).

Para abordar estas diferentes problemáticas, la investigación en la búsqueda de materiales alternativos, ha desarrollado nuevos materiales cementantes alternativos como los geopolímeros, cementos con activación alcalina y adiciones puzolánicas derivadas de subproductos industriales (Chen et al, 2022). Como resultados de estos materiales, destinados a mejorar la durabilidad y sostenibilidad del concreto, han mostrado mejoras en la reducción de emisiones de CO₂ y al desempeño de las propiedades mecánicas del concreto. Sin embargo, a pesar de los avances, no existe una metodología estandarizada que permita evaluar de manera integral la sostenibilidad de

estos nuevos materiales en comparación con los materiales tradicionales. Esto imposibilita la aplicación de soluciones sostenibles en este sector, puesto que, en la mayoría de los casos, esas decisiones dependen de sus costes o de su rendimiento, dejando de lado su impacto ambiental.

La presente investigación, pretende abordar la necesidad de desarrollar y de la que también se dispone de una metodología para evaluar la sostenibilidad de los nuevos materiales cementantes, teniendo en cuenta las variables importantes como la huella de carbono, durabilidad y eficiencia energética de su producción, el impacto de ésta en la resistencia a los esfuerzos del concreto. La elaboración de una metodología de carácter estructurado será la guía de trabajo para profesionales de la construcción, de manera que puedan tomar decisiones coherentes y fundamentadas en criterios de sostenibilidad y de comportamiento técnico. La elección de los materiales apropiados no solo ayudará a mejorar el comportamiento del concreto, sino que favorecerá la reducción del impacto ambiental, estando alineada con la construcción sostenible que se empieza a observar en la actualidad.

En este sentido, la investigación se enfocará en evaluar el comportamiento de materiales alternativos, como los geopolímeros y los cementos activados alcalinamente. A través de un análisis comparativo con los materiales convencionales, se busca generar información que respalde la adopción de soluciones más sostenibles dentro de la industria, promoviendo el uso de criterios objetivos para su implementación en proyectos de construcción.

1.2. Formulación del Problema

¿Cuál es la metodología integral más efectiva para evaluar la sostenibilidad de nuevos materiales en el concreto, permitiendo su comparación con materiales tradicionales en términos de impacto ambiental, durabilidad y eficiencia estructural en la industria de la construcción?

1.3. Objetivos de Investigación

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología integral para evaluar la sostenibilidad de nuevos materiales en el concreto, mediante un enfoque comparativo, con el fin de optimizar el ciclo de vida de las estructuras y contribuir a la reducción de la huella de carbono en la industria de la construcción.

1.3.2. Objetivos Especifico

- Identificar los criterios de sostenibilidad relevantes en la evaluación de nuevos materiales para concreto, mediante el análisis de estudios científicos y normativas, con el fin de establecer una base teórica para la metodología de evaluación.

- Desarrollar un esquema de clasificación y análisis comparativo de los materiales innovadores en el concreto, organizando la información según variables de impacto ambiental, eficiencia estructural y durabilidad, con el fin de generar una base estructurada que facilite su evaluación.
- Diseñar una metodología de evaluación que permita analizar y comparar la sostenibilidad de materiales cementantes alternativos, integrando los criterios y esquemas de clasificación definidos, con el propósito de proporcionar una herramienta útil para la toma de decisiones en la industria de la construcción.

1.4. Justificación

El hormigón es una cuestión importante dentro de la industria de la construcción, todo ello bajo la habitual necesidad de infraestructuras sostenibles que aseguren la duración y que satisfagan recursos que operen en la vida útil del mismo. El cemento Portland es el principal responsable de entre el 7% y el 8% de las emisiones del CO₂ en la fabricación de cemento, lo que convierte a la industria en una de las más contaminantes del planeta (Habert et al, 2020). Además, el deterioro prematuro de las estructuras de concreto, debido a su baja durabilidad, genera costos de reparación y mantenimiento, así como el impacto ambiental y económico (Salmi, 2024).

La importancia de esta investigación radica en dar respuesta a los problemas que pueden presentarse al producir y utilizar el concreto, así como en la necesidad de desarrollar una metodología que permita analizar la sostenibilidad de nuevos materiales incorporados en su composición. A diferencia de otros estudios que abordan cuestiones similares (Chen et al., 2022), este trabajo busca aplicar técnicas de comparación para caracterizar el desempeño ambiental y estructural en relación con los materiales tradicionales, considerando parámetros como la reducción de la huella de carbono, la eficiencia en el uso de recursos y la durabilidad del concreto.

El desarrollo de dicha metodología, constituye un aporte considerable, ya que proporciona un marco común de referencia para la evaluación de las alternativas en la construcción. Esto hará que los profesionales del sector, tomen decisiones informadas respecto a qué materiales implementar para optimizar la vida útil de las infraestructuras, contribuyendo con esto a la construcción sostenible en la industria (Yepes et al, 2015).

Este trabajo promueve competencias en metodología aplicada de sostenibilidad en materiales de construcción, respetando los ODS de la ONU, para ofrecer alternativas y así disminuir el impacto medioambiental del sector de la construcción desde una perspectiva académica (Carlsen & Bruggermann 2022).

1.5.Delimitaciones

1.5.1. Delimitación Geográfica

La investigación se llevará a cabo en el contexto de la industria de la construcción en Colombia, con un enfoque en particular en los materiales utilizados en los proyectos que se ejecuten de infraestructura

1.5.2. Delimitación Temporal

El trabajo se pretende realizar en un periodo de un semestre académico

1.5.3. Delimitación Conceptual

Las definiciones y criterios utilizados para el desarrollo y validación de una metodología, son conceptos claves que se deben tener en cuenta, como huella de carbono, durabilidad estructural, vida útil de los materiales o eficiencia en el uso de recursos. No se contemplarán materiales de construcción como acero o madera, ya que se enfocará en las innovaciones aplicables al concreto.

1.5.4. Delimitación Operativa

La investigación se desarrollará a través de una revisión bibliográfica y un análisis comparativo. Este estudio no abarcará la aplicación de estos materiales a gran escala, si no que se validara en condiciones controladas.

Capítulo 2. Marco referencial

2.1.Marco Histórico

El hormigón, uno de los tipos de materiales de construcción más utilizados a nivel mundial, ha cambiado y evolucionado mucho desde sus conocimientos hasta los desarrollos técnicos del siglo XXI (Rashad, 2013). Los materiales similares a los hormigones estaban ya en uso -en la antigüedad- en el pasado. En el año 7000 a.C., en lo que hoy es Jordania, se usaban mezclas rudimentarias de cal y mortero para la propia y la construcción de estructuras; en Egipto, para la fecha en la que nos encontramos dentro de lo anteriormente mencionado, es decir, hacia el 3000 a.C., se usaban mezclas de barro y paja para unir ladrillos y un mortero de yeso en la Gran Pirámide de Guiza (Chitty et al., 2005; Jackson et al., 2018). Es evidente que aunque se iniciaron muchos años atrás todo tipo de trabajos en este sentido, no fue la civilización romana la que llegó más lejos en cuanto al desarrollo del hormigón, ya que empleó una mezcla de cal, ceniza volcánica y agua, es decir, el opus caementicium, que, además, tenía la cualidad de endurecimiento bajo el agua y lo llevó a la construcción de las obras famosas como el Panteón y el Coliseo (Rashad, 2013).

Con el paso de los siglos, el conocimiento sobre el concreto y sus aplicaciones se diversificó y evolucionó. En el siglo XVIII, John Smeaton redescubrió las propiedades hidráulicas de la cal mezclada con materiales arcillosos, desarrollando una versión temprana del

cemento hidráulico utilizado en la construcción del faro de Eddystone en 1756 (Rispoli et al., 2019).

El siglo XIX marcó un punto de inflexión con la invención del cemento Portland por Joseph Aspdin en 1824. Este material, obtenido al calentar una mezcla de piedra caliza y arcilla, estableció las bases del concreto moderno. A partir de entonces, la producción comercial de cemento Portland se expandió rápidamente, y junto con el desarrollo del concreto reforzado en la década de 1850, se abrieron nuevas posibilidades para la construcción de estructuras más altas y resistentes (Rashad, 2013).

Durante el siglo XX, el concreto continuó evolucionando con la incorporación de aditivos químicos en las décadas de 1930 y 1940, mejorando su trabajabilidad, tiempo de fraguado y durabilidad. La invención del concreto premezclado y la introducción de bombas de concreto en los años 50 revolucionaron la manera en que se transportaba y aplicaba el material (Rashad, 2013).

La segunda mitad del siglo XX vio el surgimiento del concreto preesforzado y de alto rendimiento (HPC), que permitió construir estructuras con mayores capacidades de carga y una vida útil prolongada. Además, el uso de fibras de acero y de vidrio para reforzar el concreto se volvió común, mitigando problemas de fisuración y aumentando la resistencia a la tracción (Jackson et al., 2018; Rashad, 2013).

El comienzo del siglo XXI ha estado marcado por una creciente preocupación por la sostenibilidad y el impacto ambiental del concreto. En respuesta, se han explorado y adoptado materiales suplementarios cementicios (SCMs) como la ceniza volante, el humo de sílice y la escoria granulada de alto horno. Estos materiales son, además, una forma eficaz de mejorar las características mecánicas del concreto y, finalmente, de alcanzar también menores emisiones (de CO₂) resultantes de su producción con cemento Portland (Mehdizadeh et al., 2023).

Los avances alcanzados por la evolución que ha tenido lugar en la mejora del concreto, han conseguido aumentos inesperados de la estabilidad del concreto. La incorporación de nano-sílice y nanotubos de carbono lograron los incrementos de forma imprevista en la resistencia mecánica y en la durabilidad del concreto a nivel microestructural así como también importantes aumentos en la resistencia obteniéndose disminuciones igualmente importantes una vez asociados a la penetración de agua en el concreto (De Matteis et al., 2017; Yaman & Alam, 2022).

A su vez, se han implementado tecnologías de hormigón autocurable que son capaces de reparar fisuras a partir de la utilización de mecanismos biológicos o químicos, y por tanto estimular la duración de las estructuras de una manera considerable. La impresión del concreto en tercera dimensión es una tecnología emergente que desarrolla la capacidad de conseguir formas complejas y de disminuir el desperdicio de material, reduciendo de esta manera el tiempo de construcción y el coste del mismo (Li, 2009; Rahbar, 2020).

La evolución del concreto interpreta un proceso continuo de innovación y de adaptación que satisface la creciente demanda de la construcción. Desde las primeras mezclas utilizadas por las antiguas civilizaciones hasta las actuales técnicas de materiales avances, el concreto ha transitado del uso singular a convertirse en un pilar de la infraestructura internacional. La investigación más actual se concentra en la mejora de la durabilidad y de la sostenibilidad del concreto, asegurando de esta manera garantizar un avance continuo y así también que el concreto siga formando parte del avance en la construcción hacia un futuro más resiliente así como más sostenible (Marvila et al., 2021; Sivakrishna et al. 2020).

2.2.Marco Contextual

El concreto supone un material de construcción que se encuentra en un elevado puesto en ventas en nuestro país, abarcando una diversidad configurativa de obras urbanas, edificaciones de viviendas de interés social y donde se encuentren obras de infraestructura industrial y comercial. La industria del concreto en Colombia ha tenido un desarrollo continuo en las últimas décadas, que contrastan con la expansión de la población urbana, pero no sólo eso, sino que también, por el incremento de la infraestructura y por el aumento de la modernización por factores de tecnología y sostenibilidad (Alfonso et al., 2024).

La aplicación del concreto en el territorio colombiano tiene sus inicios en las primeras cuatro décadas del siglo XX, cuando se llevaron a cabo las primeras edificaciones y obras de infraestructura en las principales urbes. Ya cuando el país empieza a experimentar un

crecimiento económico y urbano más despegado, la industria del concreto experimenta un auge de crecimiento formal (Alfonso et al., 2024).

Durante las décadas de 1950 y 1960 la urbanización acelerada y el desarrollo de la infraestructura básica, como carreteras, puentes y edificios públicos, impulsaron la demanda de concreto. La introducción de tecnologías de concreto premezclado y el uso de aditivos comenzó a ser común en los proyectos de construcción (Trocónis De Rincon et al., 2011).

Asi mismo, en las décadas de 1970 y 1980 la construcción de grandes proyectos de infraestructura, como represas y sistemas de transporte, aumentó la demanda de concreto de alta resistencia y durabilidad. En estos años, se iniciaron investigaciones locales sobre el uso de materiales suplementarios y técnicas de refuerzo para mejorar las propiedades del concreto.

En las décadas de 1990 y 2000 la industria del concreto en Colombia experimentó una modernización significativa, con la adopción de nuevas tecnologías y procesos de fabricación. Las empresas comenzaron a invertir en plantas de concreto premezclado y a utilizar fibras y aditivos para mejorar la calidad del concreto. La normativa técnica también se fortaleció para garantizar la calidad y seguridad de las construcciones (Trocónis De Rincon et al., 2011).

En la actualidad, el concreto continúa siendo un pilar fundamental de la construcción en el país. Sin embargo, la industria tiene diferentes retos y también oportunidades. Por el crecimiento Urbano y la Demanda de la Vivienda, las ciudades del país siguen creciendo, lo que

implica una demanda permanente de vivienda y proyectos de infraestructura. Esto ha propiciado la puesta en práctica de soluciones de construcción más veloces y eficientes como el concreto autocompactante y uso de prefabricados.

Por otro lado, la necesidad de construir infraestructura que resista catástrofes naturales como terremotos y deslizamientos de tierra han dado lugar a la puesta en práctica de concretos de alto rendimiento y técnicas de diseño sísmico avanzadas. Se observa que la industria del concreto en el país está caminando hacia prácticas más sostenibles como el uso de residuos reciclados, la disminución de emisiones de CO₂ en la producción de cemento, la aplicación de tecnologías de concreto verde. Las empresas constructoras están indagando el uso de cenizas volantes, escoria granulada de alto horno y otros materiales suplementarios para incrementar la sostenibilidad del concreto.

La regulación y el uso del concreto en Colombia, están amparados por diversas normativas y estándares técnicos que poseen como objetivo garantizar la aceptación para la supervivencia de las construcciones. En esta línea, cabe consignar que el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) ampara las especificaciones para la producción y el uso del concreto, que garantizan que las prácticas de la industria estén en línea con los requisitos del estado y la sostenibilidad (Sabău et al., 2018).

El concreto en Colombia ha tenido un importante recorrido desde su nacimiento hasta la aceptación de las diversas necesidades de crecimiento en lo urbano, infraestructura resiliente o la sostenibilidad. Mediante el uso y la adopción de nuevas tecnologías y materiales de la industria

del concreto en la industria, se encuentra muy bien situado para hacer frente a las dificultades del futuro y ser un aporte en el desarrollo sostenible del país. La regulación y normativas estrictas aseguran que el uso del concreto siga siendo seguro y eficiente, los proyectos significativos ilustran el potencial del concreto para innovar y cambiar el paisaje urbano.

2.3.Marco Conceptual

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción, en virtud de su versatilidad y resistencia. La composición de este material incluye los elementos cementantes, los agregados, los aditivos y, en algunas ocasiones, las fibras, lo que puede influir en el desempeño estructural y durabilidad del concreto. La selección correcta y la proporción de los componentes resulta una cuestión fundamental para potenciar las propiedades mecánicas y mejorar el comportamiento del concreto a lo largo del tiempo (D' Alessandro et al., 2017; Kumara et al., 2023; Marvila et al., 2021). En este aspecto, se debe analizar las características de los distintos materiales y su influencia en el rendimiento del concreto con el fin de llegar a formulaciones de concreto más eficientes y sostenibles.

2.3.1. *Materias primas*

Los materiales fundamentales utilizados para la obtención del concreto están constituidos por compuestos cementantes, agregados, aditivos de tipo superplastificante y, en algunos casos, por fibras. Cada uno de los mencionados componentes condiciona de una forma u otra las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto, motivo por el cual la elección de los

materiales y su proporción tienen que ser evidentes, para el efecto de asegurar el rendimiento eficiente en las aplicaciones estructurales (Burris et al., 2015; Sofos et al., 2023).

2.3.1.1. Componentes Cementosos. Cemento Portland: El cemento Portland es el principal componente del concreto y se utiliza por su capacidad de hidratarse y formar una matriz sólida y resistente. La proporción de cemento en las mezclas de concreto varía dependiendo de la aplicación específica, generalmente entre 800-1000 kg/m³ (Ransinchung R.N. & Kumar, 2010). Un contenido alto de cemento afecta no solo los costos de producción, sino también el calor de hidratación y la estabilidad dimensional del concreto. Cementos con bajo contenido alcalino, finura media y bajo contenido de C3A son preferidos para reducir la necesidad de agua, minimizar la formación de etringita y controlar el calor de hidratación. Los cementos CEM I 52.5, ASTM Tipos I o II, y GB P.I son comúnmente recomendados para su uso en concreto de alta resistencia (Noushini et al., 2016).

Humo de Sílice (SF): El humo de sílice es un subproducto industrial de la producción de ferro-silicio con un diámetro típico de 0.2 μm . Es un componente esencial para mejorar la resistencia a la compresión y reducir la permeabilidad del concreto (Feng et al., 2024). Se ha propuesto que el contenido de humo de sílice debería ser alrededor del 25% del cemento Portland. Otros estudios han encontrado que el contenido óptimo varía entre el 20% y el 35%, dependiendo de la relación agua-cemento (w/c). La ausencia de humo de sílice puede resultar en

la formación de una estructura porosa y una baja resistencia a la compresión, especialmente bajo condiciones de curado en autoclave (Teixeira et al., 2020).

Escoria de alto horno granulada (GGBFS): La escoria de alto horno granulada se ha utilizado como material cementoso suplementario en el concreto durante muchos años (Arabi et al., 2015). Reemplazar parcialmente el cemento Portland con GGBFS puede mejorar la resistencia a largo plazo y la durabilidad del concreto. Investigaciones han mostrado que el concreto con alto contenido de GGBFS puede alcanzar resistencias a la compresión superiores a 250 MPa después del curado en autoclave (Zong et al., 2023).

Ceniza Volante (FA): La ceniza volante, un subproducto de las plantas de energía a base de carbón, se utiliza para mejorar la trabajabilidad y durabilidad del concreto. Combinada con GGBFS y humo de sílice, puede formar sistemas binarios, ternarios o cuaternarios que mejoran las propiedades mecánicas del concreto. La incorporación de ceniza volante y GGBFS ha demostrado aumentar la resistencia a la flexión y mejorar la tenacidad del concreto (Abbass et al., 2021; Lăzărescu et al., 2018; Tang et al., 2020).

Metacaolín: El metacaolín, obtenido mediante la calcinación de arcilla natural, es un material con alta reactividad puzolánica que puede reducir la retracción autógena, refinar la estructura de los poros y mejorar la resistencia temprana y la durabilidad del concreto (Sun et al., 2020). Se ha encontrado que la sustitución del humo de sílice por metacaolín puede reducir

ligeramente la resistencia a la compresión, pero su disponibilidad y bajo costo favorecen su uso (Eguchi et al., 2013; Marczyk et al., 2021).

Polvo de Caliza (LP): El polvo de caliza, un material mineral no puzolánico, puede mejorar la fluidez del concreto y contribuir a la formación de gel C–S–H, favoreciendo la estructura y el rendimiento del concreto (Srinivas et al., 2022).

2.3.1.2.Agregados. Los agregados constituyen entre el 60% y el 75% del volumen total de un concreto dado, por lo que tienen una función decisiva en el rendimiento del concreto, su resistencia y durabilidad. La naturaleza y el tamaño de los mismos pueden variar notablemente y, de esta manera, su comportamiento mecánico también se puede ver alterado. Se ha demostrado que la afinación de la selección de los agregados de los concretos amplifica la respuesta del mismo material para ciertas aplicaciones (Han & Tan, 2017; Yehia et al., 2009).

Dentro de los agregados más tradicionales utilizados, la arena de cuarzo y el polvo de cuarzo poseen una pureza y una resistencia mecánica excepcional que les dan una función idónea; el elevado coste de los mismos ha motivado la búsqueda de opciones de materiales más económicos y que no resten calidad al concreto. En este sentido, se ha explorado la posibilidad de emplear vidrio reciclado, arenas naturales o incluso ciertos tipos de agregados artificiales, que han sido evaluados en diversos estudios por su aplicabilidad técnica y económica (Rushing et al., 2017).

En esta línea nota también algunos estudios recientes hayan indagado en nuevas alternativas a la arena de cuarzo –colas de mineral de hierro, basalto triturado y diferentes tipos de caliza, por ejemplo– con propiedades similares a la resistencia y durabilidad y que pueden ser más amables con el medioambiente y con la economía de la industria de la construcción (Rushing et al., 2017).

2.3.1.3. Superplastificantes (SP). Los superplastificantes son aditivos formulados con el objetivo de mejorar la trabajabilidad del hormigón sin llegar a aumentar el contenido de agua de la mezcla. En consecuencia, se obtienen mezclas de hormigón más fluidas y homogéneas, favoreciendo así su compactación y resistencia final. Según su composición química y dosis de uso, estos aditivos mejoran el comportamiento reológico del hormigón y el tiempo de fraguado del mismo.

De todos ellos, los policarboxilatos (PCs) son los superplastificantes más utilizados para la producción de hormigones autofraguantes porque su estructura molecular, en especial la longitud y disposición de sus cadenas laterales, resultan ser determinantes para contribuir a la dispersión de las partículas de cemento y favorecer la retención del trabajo a lo largo del tiempo. Investigaciones realizadas en trabajos previos han demostrado que aplicar superplastificantes de manera diferente durante el proceso del mezclado optimiza su efecto, mejorando el fluir y reduciendo la segregación (Dhir et al., 2009; Fiat et al., 2012).

2.3.1.4.Fibras. Para la composición del concreto, la inclusión de fibras representa o resulta una de las estrategias más ampliamente utilizada en la actualidad para mejorar la ductilidad, la resistencia al impacto y la durabilidad del propio concreto. Estos, a su vez, mejoran el comportamiento estructural del concreto, en particular ante solicitaciones de tipo dinámico o frente a esfuerzos de tipo tracción.

En lo que se refiere a su empleo, entre los tipos de fibra más empleados podemos encontrar las fibras de acero y las fibras de carbono que, además de tener una buena resistencia a la tracción, son muy indicadas para la mejora del comportamiento mecánico del concreto. Su incorporación, por lo tanto, incrementa la resistencia a la tracción y a la flexión y contribuye a la disminución de la retracción autógena. Recientemente se ha visto que la combinación de diferentes tipos de fibras puede generar efectos sinérgicos en el que las propiedades del material mejoren con la incorporación de las fibras. El uso simultáneo de fibras macro y micro de acero ha evidenciado claros beneficios en cuanto a la resistencia post fisuración y de la capacidad de absorción energética, lo que mejora la durabilidad del concreto en situaciones de empleo estructurales más severas. Di Prisco et al. (2009); Lataste et al. (2008).

La propia naturaleza de la fibra empleada y su adecuada distribución y orientación en la mezcla contribuye de manera significativa a la determinación de las propiedades mecánicas finales. La correcta disposición de fibras mejora la resistencia a la flexión y la capacidad de carga del concreto, dado que se favorece una mejor transferencia de esfuerzos en la matriz cementicia. Estudios previos han evaluado el efecto de la orientación de fibras en el refuerzo, encontrando que una correcta alineación podría mejorar el comportamiento y las propiedades estructurales del material (Abousnina et al., 2021; Selyutina y Smirnov, 2023).

El conocimiento adecuado de los materiales que constituyen el concreto y sus interacciones es fundamental en el desarrollo de mezclas que cumplan con exigencias específicas de resistencia, durabilidad y sostenibilidad. La correcta selección y proporción de sus componentes no solo mejora el comportamiento mecánico del concreto, sino que también permite atenuar el impacto ambiental asociado a su producción. En este sentido, la investigación permanente en la formulación de nuevas mezclas, así como la inclusión de materiales novedosos se convierte en una importante base dentro de los avances en las tecnologías de la industria de la construcción, permitiendo también dar respuesta a las exigencias actuales en cuanto a sostenibilidad y eficiencia (Burris et al., 2015).

2.3.2. Sostenibilidad en la producción de concreto

La sostenibilidad de la producción del concreto es hoy un tema de creciente importancia debido a los relevantes impactos ambientales que provoca la producción de cemento -su ingrediente principal- y cuyo proceso de producción de cemento se considera responsable de aproximadamente un 8% de las emisiones globales de CO₂, indicando la urgencia de desarrollar prácticas más sostenibles (Grove et al., 2011; Mavi et al., 2021). Algunas de las nuevas tendencias al respecto son las que se enumeran a continuación:

2.3.2.1.Reducción de emisiones de CO₂. Uso de materiales cementicios suplementarios (SCMs):

Los SCMs, como la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno y el humo de

sílice, se utilizan como reemplazos parciales del cemento Portland tradicional (Pane et al., 2018; Salvo et al., 2015; Simatupang et al., 2019). Estos materiales no solo mejoran las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto, sino que también reducen las emisiones de CO₂ al disminuir la cantidad de clinker de cemento necesario en la mezcla (“International Conference on Chemical Sciences and Engineering: Advance and New Materials, ICCSE 2018,” 2019)

Cementos de baja emisión: Los cementos de bajo carbono, como los cementos de sulfoaluminato de calcio (CSA) y los geopolímeros, son alternativas innovadoras que emiten menos CO₂ durante su producción. Los geopolímeros, por ejemplo, se producen a partir de materiales ricos en sílice y aluminio activados con soluciones alcalinas, y pueden reducir las emisiones de carbono hasta en un 80% en comparación con el cemento Portland tradicional (Hussain et al., 2013; Teixeira et al., 2020; Yang et al., 2010).

2.3.2.2.Reutilización y reciclaje de materiales. Agregados Reciclados: El uso de agregados reciclados, provenientes de la demolición de estructuras de concreto antiguas, reduce la necesidad de extraer agregados naturales, conservando recursos naturales y disminuyendo el impacto ambiental. Además, esto ayuda a reducir los desechos de construcción y demolición en los vertederos (Occhicone et al., 2022; Salguero et al., 2014).

Incorporación de Residuos Industriales: La incorporación de residuos industriales como subproductos en la producción de concreto es otra estrategia sostenible. Ejemplos incluyen

la utilización de cenizas volantes de plantas de energía y escoria de altos hornos de la industria del acero. Estos materiales no solo mejoran las propiedades del concreto, sino que también ayudan a reducir la huella de carbono global de la construcción (Jianu et al., 2018; Kumar & Singh, 2023).

2.3.2.3.Eficiencia energética y tecnologías limpias. Optimización de Procesos de

Producción: La mejora de la eficiencia energética en las plantas de producción de cemento es crucial. Esto incluye la modernización de hornos y equipos, la recuperación de calor residual y el uso de tecnologías de molienda más eficientes. Estas medidas pueden reducir significativamente el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero (Majidi, 2009; Moghayedi et al., 2023; Zakrevskaya et al., 2018).

Captura y almacenamiento de carbono (CCS): La adopción de tecnologías de captura y almacenamiento de carbono en instalaciones de gran producción, la industria del cemento, es una tendencia emergente. La CCS consiste en capturar el CO₂ que se libera durante la producción de cemento y almacenarlo en formaciones geológicas subterráneas. Aunque continúa desarrollándose, esta tecnología tiene el potencial de reducir drásticamente el CO₂ liberado por la industria del cemento (D'Alessandro et al., 2017; Leemann et al., 2023).

2.3.2.4.Innovaciones en materiales y procesos. Bio-concreto: El bio-concreto, que incorpora bacterias que precipitan carbonato de calcio, puede auto-reparar grietas y fisuras. Esto no solo prolonga la vida útil de las estructuras de concreto, reduciendo la necesidad de

reparaciones frecuentes, sino que también contribuye a una mayor sostenibilidad al disminuir el consumo de materiales y energía asociados con el mantenimiento (Salvo et al., 2015; Susilorini et al., 2022).

Concreto Fotocatalítico: El concreto fotocatalítico contiene dióxido de titanio, que, en presencia de luz solar, puede descomponer contaminantes orgánicos y óxidos de nitrógeno en el aire. Esto no solo ayuda a mantener las superficies de concreto limpias, sino que también mejora la calidad del aire en áreas urbanas (Cassar, 2004).

2.3.2.5.Economía circular y certificaciones verdes. Economía Circular: La adopción de principios de economía circular en la producción de concreto implica el diseño de ciclos cerrados donde los materiales se reutilizan y reciclan continuamente. Esto incluye el reciclaje de agua en las plantas de concreto y el uso de desechos de construcción y demolición como materias primas.

Certificaciones y Normativas Verdes: La aplicación de certificaciones y de normativas verdes, precedidos de LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), promueve la implementación de prácticas sostenibles en la producción de concreto. Estas certificaciones validan el empleo de materiales y procesos que contribuyen a la reducción del impacto medioambiental y a un mejor funcionamiento energético.

2.3.3. Innovación en nuevos materiales

Las innovaciones en materiales de concreto están transformando la industria de la construcción, proporcionando soluciones que mejoran la durabilidad, sostenibilidad y eficiencia de las estructuras de concreto (Samui et al., 2020). Estas innovaciones consisten en:

2.3.3.1. Materiales cementicios suplementarios (SCMs). Ceniza Volante: La ceniza volante, un subproducto de la combustión del carbón en plantas de energía, se utiliza como reemplazo parcial del cemento Portland. Mejora la trabajabilidad, reduce la permeabilidad y aumenta la resistencia a largo plazo del concreto (Tang et al., 2020).

Escoria Granulada de Alto Horno: Proveniente de la industria del acero, la escoria granulada de alto horno también se utiliza como reemplazo del cemento. Mejora la durabilidad del concreto y reduce su huella de carbono (Rong et al., 2024a).

Humo de Sílice: El humo de sílice, un subproducto de la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio, es extremadamente fino y se utiliza para aumentar la resistencia y reducir la permeabilidad del concreto. Es particularmente útil en aplicaciones de alto rendimiento (Feng et al., 2024).

Metacaolín: Un material derivado de la calcinación de la caolinita, mejora la resistencia y durabilidad del concreto al reducir la cantidad de productos de hidratación que pueden ser atacados por químicos agresivos (Dinakar, 2011).

2.3.3.2.Nanomateriales. Nano-sílice: El nano-sílice se utiliza para mejorar la microestructura del concreto. Incrementa la resistencia a la compresión, reduce la porosidad y mejora la resistencia a la fisuración (Simatupang et al., 2019).

Nano-titanio Dióxido: El dióxido de titanio nanoestructurado se utiliza en concreto fotocatalítico, que tiene propiedades autolimpiantes y descontaminantes. Ayuda a descomponer contaminantes orgánicos y óxidos de nitrógeno cuando se expone a la luz solar (Bunea et al., 2023).

Nanotubos de Carbono: Los nanotubos de carbono se utilizan para mejorar las propiedades mecánicas del concreto. Proporcionan una alta resistencia a la tracción y mejoran la capacidad de disipación de energía (Jan et al., 2009).

2.3.3.3.Fibra de refuerzo. Fibra de Acero: Las fibras de acero se utilizan para mejorar la resistencia a la tracción y la ductilidad del concreto. Son especialmente útiles en aplicaciones que requieren alta resistencia al impacto y a la fatiga (Ekr et al., 2018).

Fibra de Vidrio: Las fibras de vidrio proporcionan resistencia a la tracción y a la corrosión. Se utilizan en aplicaciones donde se requiere un acabado superficial liso y duradero (Wang et al., 2023)

Fibra de Polipropileno: Las fibras de polipropileno ayudan a controlar la fisuración por retracción plástica en el concreto. Mejoran la durabilidad y la resistencia al fuego del material (Kathirvel et al., 2019).

Fibras Naturales: Fibras como el cáñamo, el bambú y el coco se utilizan como alternativas sostenibles. Estas fibras mejoran la resistencia y flexibilidad del concreto, además de ser biodegradables y de bajo costo (Galan-Marin et al., 2016).

2.3.3.4. Concreto autorreparable. Microcápsulas: Las microcápsulas que contienen agentes reparadores se integran en el concreto. Cuando se produce una fisura, las microcápsulas se rompen y liberan el agente reparador, que reacciona con el agua y el aire para sellar la fisura (Pomianowski & Jensen, 2019).

Bacterias: El concreto con bacterias específicas, como *Bacillus sphaericus*, puede precipitar carbonato de calcio cuando entra en contacto con agua, sellando automáticamente las fisuras y prolongando la vida útil de la estructura (Pomianowski & Jensen, 2019).

Agentes Químicos: Agentes químicos como polímeros y resinas pueden ser incorporados en el concreto para reparar fisuras. Estos agentes se activan por cambios en la humedad o en el pH del entorno (Hooton et al., 2017).

2.3.3.5. Concreto fotocatalítico. El concreto fotocatalítico incorpora dióxido de titanio, que, en presencia de luz solar, actúa como catalizador para descomponer contaminantes orgánicos y óxidos de nitrógeno en el aire. Este tipo de concreto no solo mantiene las superficies limpias, sino que también contribuye a mejorar la calidad del aire en áreas urbanas (Jamaludin et al., 2022).

2.3.3.6. Concreto geopolimérico. Los geopolímeros son una alternativa al cemento Portland que se producen a partir de materiales aluminosilicatos activados con soluciones alcalinas. Este tipo de concreto ofrece una huella de carbono significativamente menor y una alta resistencia a la corrosión, a la temperatura y a los productos químicos (Boxley et al., 2008).

2.3.3.7. Concreto de alta resistencia y ultra alta resistencia (HPC y UHPC). Concreto de

Alta Resistencia (HPC): HPC se diseña para tener propiedades mecánicas y de durabilidad superiores a las del concreto convencional. Utiliza una combinación optimizada de cemento, SCMs, agregados finos y aditivos para alcanzar resistencias a la

compresión superiores a 50 MPa (“High-Strength Concrete (ACI 363R): By ACI Committee 363 - High-Strength Concrete,” 2005).

Concreto de Ultra Alta Resistencia (UHPC): UHPC es una forma avanzada de concreto que puede alcanzar resistencias a la compresión superiores a 150 MPa. Incorpora fibras de alta resistencia y una matriz de cemento densificada para lograr una durabilidad extrema y una resistencia excepcional (Zhang et al., 2024).

2.4.Marco Teórico

El desarrollo de nuevas técnicas constructivas y la investigación de nuevos materiales sostenibles en la edificación han cobrado considerable importancia en la actualidad, considerando la necesidad de reducir el impacto ambiental producido por el uso del concreto. Recientes estudios han corroborado diversas estrategias de mejora de la sostenibilidad del concreto que van desde la sustitución parcial del cemento Portland hasta la incorporación de aditivos que mejoren sus cualidades estructurales y contribuyan a la reducción de la huella de carbono.

Estudios recientes han analizado el impacto en las emisiones de CO₂ al sustituir el cemento por otros materiales puzolánicos como las cenizas volantes, la escoria de horno alto o la sílice activada (Chen et al., 2022). Estos materiales presentan un buen potencial para reducir las emisiones de CO₂ en la producción del concreto, además de que, al combinarse con el cemento,

mejoran la resistencia del concreto frente a condiciones medioambientales adversas. Otros estudios, como el de Zhang y Li (2023), evaluaron el uso de nanomateriales como el grafeno y las nanoarcillas en la composición del concreto, observando mejoras tanto en la resistencia mecánica como en la duración de la vida útil de los elementos construidos con estos nuevos tipos de compuestos.

Además, diversos trabajos han estudiado la utilización de residuos industriales y plásticos reciclados para la elaboración del concreto como una forma de disminuir el impacto ambiental que provoca su disposición final (Gómez et al. 2023). Asimismo, numerosas investigaciones han trabajado en la incorporación de fibras sintéticas y naturales a la mezcla para entender la mejora de la ductilidad y la resistencia al impacto del concreto. No obstante, algunos de estos trabajos han advertido que la adición de las fibras puede afectar negativamente la trabajabilidad de la mezcla, lo que necesitaría nuevos estudios para optimizar esta adición en aplicaciones estructurales (Martínez & Rodríguez 2023).

Otro de los frentes en el estudio del concreto sostenible ha sido el de la optimización de su proceso de curado. Según Pérez y Almeida (2024), las estrategias de curado interno por medio de agentes encapsulados permiten una reducción de la demanda de agua, así como una mejora de la autoconservación del concreto, lo que viene a ser un avance muy importante en términos de eficiencia ambiental. A su vez, la utilización de modelos de evaluación del ciclo de vida ha permitido cuantificar de manera objetiva el impacto ambiental del concreto elaborado con materiales alternativos y compararlo con el de métodos tradicionales (Torres et al. 2024).

A pesar de los avances en el desarrollo de materiales sostenibles para la construcción, persisten desafíos en su implementación a gran escala. Factores como la variabilidad en la calidad de los materiales reciclados, la ausencia de normativas específicas y las barreras económicas han limitado su adopción en la industria (Jiménez & Castro, 2024). Ante este panorama, surge la necesidad de establecer metodologías estandarizadas que permitan evaluar integralmente la sostenibilidad de los materiales cementantes alternativos. Este estudio se orienta hacia la formulación de un modelo metodológico que permita comparar de manera objetiva estos materiales en función de su impacto ambiental, eficiencia energética y desempeño mecánico, con el fin de proporcionar herramientas que faciliten la toma de decisiones en la industria de la construcción.

2.5.Marco Legal

2.5.1. Contexto internacional

El marco normativo internacional que regula el desarrollo del concreto así como la inclusión de los materiales innovadores para mejorar su durabilidad y sostenibilidad se encuentra, en gran parte, amparado en todo un conjunto de normativas y normas técnicas adoptadas por los organismos de normalización internacionales y las normativas nacionales. Estas normas definen criterios técnicos y medioambientales que condicionan la construcción, producción y utilización del hormigón en el sector de la edificación.

Por lo que respecta las principales referencias técnicas están representadas por las normas del organismo de normalización internacional, como, por ejemplo, la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM), ya que se dedican a definir especificaciones y metodologías de ensayo para los materiales de la edificación (el cemento, los áridos y el hormigón). Su aplicación garantiza la calidad, seguridad e interoperabilidad de los materiales que se utilizan para desarrollar proyectos de infraestructuras en todo el mundo, ya que permiten su certificación y utilización en contextos normativos diferentes.

La Directiva de Productos de Construcción establece un conjunto de normas de armonización de la comercialización de productos de construcción, donde se incluye el concreto y sus elementos, favoreciendo no solo la libre circulación de elementos dentro de la Unión, sino que les impone en paralelo condiciones extremas de sostenibilidad y seguridad para asegurar su comportamiento en condiciones reales de uso.

A nivel internacional, los distintos tratados y convenios multilaterales han propiciado la aplicación de prácticas más sostenibles en la propia industria de la construcción, tal y como atestigua, por ejemplo, el Acuerdo de París sobre el cambio climático, que solicita a los países firmantes que reduzcan sus emanaciones de gas de efecto invernadero. Todo ello ha potenciado el seguimiento sobre la reducción de la huella de carbono en la producción y uso del concreto, propiciando nuevas innovaciones en los elementos con menor impacto ambiental.

Por otro lado, programas de certificación ambiental, como LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) y BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), han adquirido gran relevancia en la promoción de prácticas constructivas sostenibles. Estos esquemas de certificación establecen criterios rigurosos para la selección de materiales de construcción, incentivando el uso de productos que cumplan con estándares de eficiencia energética, reducción de emisiones y minimización del impacto ambiental a lo largo del ciclo de vida de la edificación.

2.5.2. Contexto nacional

El marco legal colombiano relacionado con el tema de los avances en la mejora del concreto, la exploración y evaluación de nuevos materiales para aumentar la durabilidad y sostenibilidad en la construcción, abarca diversas normativas, códigos de construcción, estándares técnicos y políticas públicas que regulan la producción, uso y mantenimiento de estructuras de concreto en el país.

En Colombia, las normativas generales para la construcción y el uso de materiales de construcción están reguladas por el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, a través del Código Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Este código establece los requisitos mínimos de diseño, construcción y mantenimiento de estructuras, incluyendo el uso de concreto y otros materiales de construcción.

El uso de cemento en Colombia está regulado por la normativa técnica NTC 121 y NTC 334. Estas normas especifican los requisitos de calidad para el cemento Portland y otros tipos de cemento utilizados en la industria de la construcción. También se regulan los materiales cementicios suplementarios (SCMs), como la ceniza volante y la escoria granulada de alto horno, que deben cumplir con normativas específicas para su uso en mezclas de concreto.

El diseño y construcción de estructuras de concreto en Colombia deben cumplir con los requisitos establecidos en el NSR-10. Este código define parámetros específicos para el diseño sísmico, resistencia estructural, durabilidad y seguridad de las estructuras de concreto, asegurando que se utilicen materiales y técnicas adecuadas para resistir las condiciones ambientales y de carga previstas.

Colombia ha promovido un conjunto de normativas que pretenden fomentar la industria de la construcción en términos sostenibles. En este sentido las condiciones necesarias las podemos encontrar en la Ley 99 de 1993 y la Resolución 601 de 2006, dado que éstas ayudan a la creación de un marco de referencia para la gestión ambiental que concreta determinados requerimientos. Entre éstos requerimientos se encuentran la limitación de las emisiones de CO₂ y el fomento de condiciones de prácticas de construcción sostenible; en este sentido el uso de materiales reciclados, la optimización de recursos y la utilización de tecnologías limpias de producción delimitan los parámetros generales a seguir en la producción de concreto.

Por otro lado, cabe mencionar que el Gobierno colombiano ha desarrollado programas de políticas públicas y programas de incentivos para promover la innovación y el uso de tecnologías en la construcción. Existen subsidios para proyectos de investigación y desarrollo en materiales de construcción sostenibles y el incentivo fiscal para empresas que adopten prácticas de construcción verde y tecnologías limpias.

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) es el organismo encargado de certificar la calidad de los materiales de construcción en Colombia. A través de la certificación NTC, se asegura que los materiales de concreto cumplan con los estándares nacionales e internacionales de calidad y seguridad, garantizando su adecuado desempeño en aplicaciones estructurales y no estructurales.

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cualitativo de tipo descriptivo, con un proceso de análisis, organización y clasificación de información relevante sobre la sostenibilidad de nuevos materiales en el concreto. El estudio se enfocará en la sistematización de datos provenientes de normativas, investigaciones científicas y reportes técnicos, con el propósito de estructurar una metodología integral que permita evaluar la viabilidad de materiales cementantes alternativos en términos de impacto ambiental, desempeño estructural y durabilidad.

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto

Para lograr este objetivo, la investigación se llevará a cabo en tres fases fundamentales. En la primera fase, se identificarán los criterios esenciales para evaluar la sostenibilidad y el comportamiento mecánico de los materiales innovadores utilizados en la producción de concreto. Esta etapa comprenderá un análisis detallado de normativas nacionales e internacionales relacionadas con la construcción sostenible, así como el estudio de literatura científica y técnica que aborde la reducción de la huella de carbono, el consumo energético en la fabricación de materiales y su desempeño estructural. A partir de esta información, se establecerán los parámetros clave que servirán de base para la evaluación comparativa.

En la segunda fase, se procederá a la organización y clasificación de los datos obtenidos en la fase anterior, con el fin de generar un esquema de análisis que permita comparar los diferentes materiales en función de su sostenibilidad y desempeño mecánico. La información recopilada será sistematizada de acuerdo con variables como impacto ambiental, eficiencia en el uso de recursos, resistencia y durabilidad. Se analizarán las ventajas y limitaciones de cada material en relación con los convencionales, estableciendo una estructura de referencia que facilite su evaluación de manera integral.

Finalmente, en la tercera fase, se desarrollará una metodología estructurada para la evaluación de la sostenibilidad de nuevos materiales en el concreto. Esta metodología se formulará a partir de la síntesis de la información obtenida en las fases previas, estableciendo un procedimiento claro para la evaluación y comparación de los materiales alternativos. El diseño metodológico permitirá que la industria de la construcción cuente con una herramienta práctica para la selección de materiales con un menor impacto ambiental y un desempeño óptimo en términos de resistencia y durabilidad.

Tabla 1

Modelo Metodológico

Objetivos de la investigación	Actividades por objetivo	Indicador por actividad
Identificar los criterios de sostenibilidad relevantes en la evaluación de nuevos materiales para concreto, mediante el análisis de estudios científicos y normativas, con el fin de establecer una base teórica para la metodología de evaluación.	• Análisis de normativas nacionales e internacionales sobre sostenibilidad en la construcción. • Estudio de investigaciones previas sobre impacto ambiental, desempeño estructural y durabilidad de materiales cementantes alternativos.	Número total de publicaciones recopiladas, trabajos de grado, libros, normas y revistas. Número de documentos relevantes de sostenibilidad
	• Selección de los criterios más relevantes para la evaluación de la sostenibilidad. • Organización de los materiales analizados en función de criterios definidos en la fase anterior.	Lista de criterios de sostenibilidad para la evaluación de materiales innovadores Número de materiales seleccionados y evaluados según los diferentes aspectos
Desarrollar un esquema de clasificación y análisis comparativo de los materiales innovadores en el concreto, organizando la información según variables de impacto ambiental, eficiencia estructural y durabilidad, con el fin de generar una base estructurada que facilite su evaluación.	• Comparación cualitativa de las propiedades mecánicas y ambientales de los materiales innovadores frente a los tradicionales. • Construcción de una base de datos estructurada que facilite el análisis de los materiales según sus características	Tabla comparativa con fortalezas y debilidades de cada material evaluado. Esquema metodológico que sintetice el análisis comparativo de los materiales.

	• Elaboración de una metodología estructurada para la evaluación de materiales sostenibles en el concreto.	Documento metodológico con los pasos definidos para la evaluación de sostenibilidad.
Diseñar una metodología de evaluación que permita analizar y comparar la sostenibilidad de materiales cementantes alternativos, integrando los criterios y esquemas de clasificación definidos, con el propósito de proporcionar una herramienta útil para la toma de decisiones en la industria de la construcción.	• Síntesis de la información obtenida en las fases previas para definir un procedimiento de análisis aplicable en proyectos de construcción.	Procedimiento metodológico detallado con criterios, pasos y herramientas de evaluación..
	• Definición de lineamientos y recomendaciones basadas en los hallazgos del estudio.	Documento con directrices y sugerencias para la implementación de la metodología en proyectos de construcción.

3.3 Población

La población del estudio está conformada por todas las investigaciones, reportes técnicos y normativas que abordan la sostenibilidad del concreto y la evaluación de materiales innovadores en la construcción. Esto incluye artículos científicos, documentos normativos nacionales e internacionales, informes de organismos especializados y estudios de caso que

analicen el impacto ambiental, la huella de carbono, el consumo energético y el desempeño mecánico de materiales cementantes alternativos.

3.4 Muestra

Dado el enfoque cualitativo de la investigación, la selección de la muestra se realizará mediante un muestreo no probabilístico de tipo intencional, lo que implica que el investigador definirá los documentos y fuentes más relevantes en función de los criterios previamente establecidos.

3.5 Técnicas de recolección y análisis de la información

Para el desarrollo de esta investigación, se empleará una metodología basada en la obtener información relevante sobre la sostenibilidad del concreto y el desempeño de materiales innovadores en su producción.

3.5.1. Técnicas de Recolección de Información

La recolección de datos se realizará a través de la búsqueda y selección de documentos científicos, normativos y técnicos, utilizando bases de datos académicas reconocidas y fuentes oficiales en el ámbito de la construcción sostenible.

3.5.2. Técnicas de Análisis de Información

Una vez recopilados los documentos, la información será analizada mediante un enfoque comparativo y de categorización temática, con el fin de identificar tendencias, relaciones y diferencias en los criterios de sostenibilidad aplicados en el concreto con materiales innovadores.

Capítulo 4. Resultados

4.1 Identificación de los criterios de sostenibilidad relevantes en la evaluación de nuevos materiales para concreto, mediante el análisis de estudios científicos y normativas, con el fin de establecer una base teórica para la metodología de evaluación.

La sostenibilidad dentro de la industria de la construcción ha pasado a desembocar en una condición fundamental dentro del contexto de la crisis ambiental del planeta. Así, el concreto, al ser uno de los materiales más usados, se erige como un objeto de estudio debido, por un lado, a la elevada huella de carbono que presenta, y por otro, a las posibilidades que ofrece para innovar en su composición. Este capítulo trata sobre dar a identificar y definir cuáles son los criterios que son necesarios para poder evaluar la sostenibilidad de los nuevos materiales para el concreto, de forma que se pueda construir una base teórica que ayude a conducir el análisis comparativo y el diseño metodológico del proyecto.

4.1.1. Revisión de fuentes documentales

Con la finalidad de hacer evidente y cien por cien justificada la elección, así como la determinación de los criterios de evaluación a ser utilizados, establecimos un proceso de revisión crítica de normas internacionales reconocidas y estudiadas que determinan criterios o valores de referencia específicamente en cuanto a los aspectos ambientales, energéticos y de calidad de los

materiales para la construcción. La presentación de cada uno de los principales criterios de referencia resaltados en las normativas analizadas aparece a continuación.

4.1.1.1 ISO 14064, sobre la gestión de gases de efecto invernadero. La norma ISO 14064 incorpora pautas indicativas que describen la forma de proceder a la cuantificación y al informe de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) tanto a nivel organizacional como a nivel de proyecto. Aunque no es una norma centrada en las materias de la construcción, sino en procesos industriales, establece un marco general que permite medir el impacto ambiental para procesos industriales. Un ejemplo evidente de ello es la producción de cemento y, por extensión, la producción de hormigón.

En el presente trabajo, esta norma ISO 14064 pautará la forma de calcular y de comparar las emisiones de CO₂ equivalentes de los materiales seleccionados. Desde la estandarización de la forma de cuantificar el factor de impacto directo e indirecto de la fabricación de hormigón, esta norma permitirá que este criterio se incorpore en la matriz de evaluación de la sostenibilidad.

4.1.1.2 ISO 14067, sobre la huella de carbono de los productos. La norma ISO 14067 establece los requisitos para la cuantificación y comunicación de la huella de carbono de un sistema de producto en el ciclo de vida, y es fundamental para el análisis de nuevos materiales en

el hormigón, ya que implica considerar todas las etapas del mismo, a saber: materias primas, producción, uso y fin de vida.

La presente norma ISO 14067 será la que guíe la comparación de los impactos climáticos de cada uno de los tipos de hormigón analizados, desde su origen hasta su fin de vida, como soporte para el cálculo de la huella de carbono total, que a su vez se constituirá en criterio clave para la evaluación multicriterio de la sostenibilidad.

4.1.1.3 ISO 21930, sobre las declaraciones ambientales de productos de construcción. La norma ISO 21930 establece los principios y requisitos para la elaboración de las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD) para productos de la construcción. Las EPD son las declaraciones que contienen la información verificable y comparable sobre el impacto ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida. La norma ISO 21930 hace hincapié en varios indicadores, tales como el potencial de calentamiento global, el consumo de energía primaria, la acidificación del agua, la acidificación del suelo, la producción de residuos sólidos, etc. Se ha convertido en una norma de referencia central en la evaluación ambiental por medio de la metodología del análisis de ciclo de vida (ACV).

La norma ISO 21930 se utilizará en este trabajo como marco para la evaluación y comparativa de los datos ambientales secundarios disponibles tanto para el concreto tradicional como para el concreto innovador. Las EPD que cumplan la norma ISO 21930 proporcionarán datos estandarizados para los indicadores que alimentan los criterios de "consumo energético",

"impacto ambiental" y "durabilidad esperada" en la matriz de sostenibilidad, garantizando de esta forma que los datos con los que vamos a trabajar tienen una base normativa clara y comparable.

4.1.1.4 ASTM E2129, sobre la evaluación del impacto ambiental. La norma ASTM E2129 establece un método normalizado para recoger y exponer información ambiental para producir materiales de construcción, diseñada para lograr un acceso a la información que permita llevar a cabo evaluaciones ambientales comparativas, considerando aspectos como el uso de energía en la fabricación, las emisiones a la atmósfera, el consumo de agua, el contenido reciclado, la durabilidad del producto, la toxicidad, el potencial de reciclabilidad y residuos sólidos generados. Esta norma no sustituye a un análisis del ciclo de vida completo, sino que ofrece una forma práctica y directa para evaluar el impacto de un producto de una forma sistemáticamente estándar.

ASTM E2129 va a servir como guía metodológica para organizar y evaluar los datos ambientales disponibles de cada tipo de concreto: los indicadores que define esta norma van a ser utilizados como base para la organizar los criterios ambientales de la matriz comparativa, especialmente en los apartados referentes al uso eficiente de los recursos, la forma en que se consume energía y la generación de residuos. Esta norma permitirá hacer la comparación homogénea de materiales que no tienen una EPD completa, pero tienen información parcial utilizando este formato técnico.

4.1.1.5 ASTM C666 y C1202, sobre la durabilidad del concreto en condiciones

extremas. Las normas ASTM C666 y ASTM C1202 están dirigidas a evaluar la durabilidad de las mezclas de concreto frente a condiciones agresivas. La ASTM C666 quiere conocer la resistencia de estas mezclas a ciclos de congelación y descongelación, el cual simula condiciones climáticas severas. Evalúa el deterioro por pérdida de masa, y una reducción del módulo dinámico. La ASTM C1202, por su parte, evalúa la permeabilidad del concreto en relación a los iones cloruro, que constituyen el tipo de durabilidad en el que se presenta la reacción a la corrosión, en este caso del acero de las armaduras. Cuanto más baja sea la carga eléctrica total medida (en coulombs), mayor será la resistencia del concreto al ingreso de los agentes corrosivos.

Estas normas contarán con una aplicación en la estructuración de la categoría de “durabilidad” en el contexto de la matriz de sostenibilidad. La durabilidad, de hecho, es un parámetro de vital importancia para evitar operaciones de intervención, maximizar la vida útil de las estructuras y, en consecuencia, minimizar el impacto ambiental acumulado. Las cifras referenciales de las normas servirán para clasificar los distintos materiales evaluados en función de su comportamiento ante las condiciones extremas, con que permitan jerarquizar su sostenibilidad técnica a largo plazo.

4.1.1.6 ISO 14021 y 14024, sobre el etiquetado ambiental y reciclabilidad. La norma ISO 14021 establece los principios para las declaraciones ambientales autodeclaradas por el fabricante, incluyendo términos como “reciclable”, “contenido reciclado” y “biodegradable”,

basados en criterios verificables. Se enfoca en brindar transparencia y evitar declaraciones engañosas. Por su parte, la ISO 14024 establece los principios para los programas de etiquetado ambiental tipo I, que otorgan certificaciones a productos con mejor desempeño ambiental dentro de una categoría específica. Estas etiquetas permiten al consumidor o al diseñador identificar productos con ventajas ambientales objetivas y verificadas por terceros.

Ambas normas respaldarán el análisis de criterios asociados a la eficiencia en el uso de recursos y el potencial de reciclabilidad en los concretos evaluados. Servirán como soporte para interpretar correctamente declaraciones ambientales presentes en fichas técnicas o EPDs, y para identificar la proporción de materiales reciclados utilizados o reciclables al final del ciclo de vida. Esto permitirá clasificar los materiales no solo por su desempeño inmediato, sino también por su compatibilidad con estrategias de economía circular.

4.1.2. Criterios de evaluación

El análisis de los materiales de concreto tradicionales y de los materiales de concreto innovadores requiere el uso de un conjunto de criterios que permitan valorar el comportamiento ambiental, así como el comportamiento técnico, de dichos materiales. Estos criterios han sido definidos partiendo de normas internacionales como ISO 14064, ISO 14067, ISO 21930 o ASTM E2129 que ayudan a valorar el comportamiento de los materiales en cuanto a sostenibilidad. Seguidamente, se presentan las descripciones de los criterios seleccionados.

4.1.2.1 Impacto ambiental. Uno de los primeros aspectos considerados es el impacto ambiental, es decir, la cantidad de gases de efecto invernadero producidos en la elaboración del material, expresado en kg de CO₂ equivalente/m³. Este aspecto es básico para poder cuantificar el aporte del material al cambio climático, en especial considerado el alto impacto que se produce en el sector de la construcción, en el que el hormigón convencional representa una de las principales fuentes de emisión. Normas como la ISO 14064 y la ASTM E2129 dictan unas especificaciones precisas para poder calcularlo y, de esta forma, poder identificar aquellos materiales que podrían tener una menor huella climática al formar parte de su proceso industrial de subproductos o por su producción menos intensiva.

4.1.2.2 Huella de carbono. Un aspecto complementario al anterior, se trata de la huella de carbono, que amplía el análisis anterior con el ciclo de vida del producto. Por medio de la norma ISO 14067, se establece un marco técnico para poder cuantificar las emisiones que se dan en todas estas etapas: producción, transporte, uso y fin de vida. También permite reconocer soluciones constructivas que requieran más energía para producirse, pero que puedan compensar su impacto gracias a su mayor durabilidad o menor necesidad de mantenimiento.

4.1.2.3 Consumo energético. Un aspecto significativo es el consumo energético, número que indica el consumo total de energía primaria del material durante el proceso de producción y que se recoge normalmente en megajulios por unidad de volumen. Mediante la exposición de otros estándares como ISO 21930 o ASTM E2129 es posible evidenciar el consumo energético y poder relacionarlo con la eficiencia de los procesos de producción. Un material que implica un

menor consumo energético en su elaboración no sólo da cuenta de una reducción de la huella ambiental que produce, sino también puede ser de ventaja en términos económicos en procesos de producción en línea de grandes volúmenes de productos. Durante el desarrollo de esta investigación, este criterio nos permitirá identificar materiales que, haciendo uso de tecnologías de activación alcalina o bien de reciclado de residuos, sean capaces de reducir el consumo de combustibles fósiles

4.1.2.4 Durabilidad. Aparte del comportamiento medioambiental, tiene especial consideración, en el análisis de sostenibilidad, la durabilidad de los materiales, ya que un material con una vida útil mayor reduce intervenciones, mantenimientos o sustituciones anticipadas. Tal característica se encuentra ligada a la resistencia del material a condiciones agresivas tales como ciclos de congelación-descongelación, ataque por agentes químicos o ingreso de cloruros. Pruebas normalizadas como la ASTM C666 y la ASTM C1202 permiten establecer cuantitativamente la fuerza de resistencia, bien sea mediante la pérdida de masa, la agresión de la estructura o la permeabilidad. En este caso, durabilidad será una propiedad no sólo mecánica, sino que será considerada un indicador importante del ciclo de la vida útil de las estructuras edificadas, en la medida que este impera la huella medioambiental que la estructura acumulará a largo plazo.

4.1.2.5 Desempeño estructural. El rendimiento estructural hace referencia a la capacidad del material para cargarse y para resistir esfuerzos mecánicos de tal forma de no comprometer la seguridad y la funcionabilidad de la estructura al ser sometida a las cargas

especificadas, por eso este criterio incluye propiedades como la resistencia a la compresión y a la tracción o flexión y se mide generalmente mediante ensayo regularizado como la ASTM C39 (compresión) o ASTM C78 (flexión). Si bien todos los materiales que se han escogido deben cumplir con unos mínimos requisitos estructurales, pero en la presente investigación se valorarán los que, aun siendo sostenibles, mantengan o superen el perfil de rendimiento de los hormigones convencionales, porque de esta forma se demostrará que un menor impacto ambiental no tiene por qué suponer un menor rendimiento estructural.

4.1.2.6 Eficiencia en uso de recursos. Se incluyó el criterio de eficacia en el uso de los recursos, es decir, se medirá el grado de utilización de materiales reciclados o de subproductos industriales en la mezcla; la eficacia no solo tiene beneficios económicos (reducción de la dependencia de materias primas vírgenes), sino también ambientales (disminución de la generación de residuos, cierre de ciclos de materiales). La norma ISO 14021 establece parámetros para identificar el contenido reciclado así como para validar las autodeclaraciones ambientales. En este trabajo se determinará qué proporción de los componentes de cada hormigón provienen de fuentes recicladas y qué grado de incidencia tienen en su sostenibilidad.

4.1.2.7 Reciclaje y reutilización. Por último, se añaden las opciones de reciclabilidad, que hacen referencia a la opción de poder material reutilizar un material o alguna de sus partes a lo largo de su vida útil, sin que fueran a emplearse estrategias que requirieran incorporar métodos intensivos o contaminantes; criterio que se basa en la norma ISO 14024, que respalda los programas de certificación ambiental según el tipo I y establece un tipo de concreto muy

reciclable y que permite reducir su impacto posterior al consumo en su vida efectiva, además de ser un tipo de concreto que se atiene a los parámetros que son habituales en la economía circular relacionada con la actividad de la construcción. En esta investigación, este aspecto va a ser relevante para entender qué grado de compatibilidad puede tener cada alternativa para que los proyectos generen una gestión de los residuos que sea sostenible en los momentos finales del ciclo de vida del material.

4.1.3. *Matriz de criterios de evaluación*

Siguiendo los parámetros previamente establecidos, se formuló una matriz que permite sistematizar la información a usar para llevar a cabo el análisis comparativo entre los concretos tradicionales y los innovadores. Así, la matriz permite la lectura de los datos técnicos y los datos ambientales, dado que sistematiza los indicadores que serán utilizados en la metodología de evaluación.

A este respecto, la matriz permite, unificar las definiciones y las unidades de medida para poder obtener una valoración precisa de cada criterio aplicando todos los mismos criterios y, al mismo tiempo, permite relacionar cada criterio con su norma correspondiente, garantizando así la trazabilidad y la objetividad de todo el proceso de evaluación. Así, se genera un marco técnico que permite sustentar las decisiones tomadas durante el proyecto.

Tabla 2*Matriz con los criterios de evaluación*

Criterio	Definición	Unidad de medida	Norma asociada
Impacto ambiental	Emisiones de gases de efecto invernadero durante la producción	kg CO ₂ eq/m ³	ISO 14064 / ASTM E2129
Huella de carbono	Emisiones totales de CO ₂ equivalente durante todo el ciclo de vida del material	kg CO ₂ eq	ISO 14067
Consumo energético	Energía utilizada en la fabricación por unidad de volumen	MJ/m ³	ISO 21930 / ASTM E2129
Durabilidad	Resistencia del material frente a agentes químicos y ambientales	Años de vida útil estimados	ASTM C666 / ASTM C1202
Desempeño estructural	Capacidad de resistir esfuerzos de compresión, tracción y flexión	MPa	ASTM C39 / ASTM C78
Uso eficiente de recursos	Porcentaje de materiales reciclados o subproductos industriales incorporados	% de contenido reciclado	ISO 14021
Potencial de reciclabilidad	Posibilidad de reutilización o reciclaje del material tras su vida útil	% reciclable	ISO 14024

4.2 Desarrollo de un esquema de clasificación y análisis comparativo de los materiales

innovadores en el concreto, organizando la información según variables de impacto

ambiental, eficiencia estructural y durabilidad, con el fin de generar una base estructurada

que facilite su evaluación.

La necesidad de abordar problemas de sostenibilidad en la construcción ha hecho que se busquen y desarrollen nuevos materiales para el concreto que, sin renunciar a los requisitos de rendimiento técnico que garantizan la seguridad y la durabilidad, reduzcan al máximo su impacto ambiental, alimentando también el desvelo profesional por la sostenibilidad del medioambiente. En este sentido, resulta importante constituir una base comparativa, clara, que permita comparativamente evaluar de manera ordenada los materiales tradicionales y los materiales considerados innovadores.

Este capítulo pretende, por tanto, clasificar los materiales seleccionados y organizar la información técnica y ambiental relevante para cada uno de ellos mediante el esquema comparativo que incorpora criterios como el impacto ambiental, la eficiencia estructural y la durabilidad. Con ello se da cumplimiento al segundo objetivo específico de la investigación.

4.2.1 Selección de materiales

Se eligieron cuatro tipos de concreto para este estudio, uno de ellos convencional y los tres restantes con bases innovadoras. La elección de aquellos materiales se hizo según su grado de implementación industrial, su soporte técnico y su aptitud para someterlos a una evaluación de aceptación en función de los criterios de sostenibilidad expuestos en el capítulo anterior.

El concreto convencional de cemento Portland se eligió como material de referencia para esta investigación. Esta elección se apoya en el hecho de que es el tipo de concreto que más se

emplea en el mundo, no solo para obras de infraestructura, sino también para edificación de viviendas, comercios y edificios públicos. Este uso tan extendido del concreto convencional lo ha convertido en un mínimo punto de partida para cualquier evaluación comparativa, ya que se puede establecer un mínimo de referencia técnica frente al que se puedan comparar otras formulaciones de carácter alternativo.

Adicionalmente, dicho material presenta una composición claramente definida: mezcla de cemento Portland, agua, agregados finos y gruesos, con o sin aditivos. Su comportamiento estructural se encuentra extensamente documentado y regulado por normas técnicas nacionales e internacionales, lo que permite obtener datos comparativos y fiables. Sin embargo, la obtención del cemento Portland es una de las fuentes más importantes de emisiones de CO₂ del sector de la construcción, por la calcinación de carbonatos en hornos a alta temperatura, sumado a la utilización intensificada de energía fósil. De este modo, el hormigón convencional no solamente representa la línea de base técnica, sino que también se convierte en punto de partida para evaluar el potencial de mejora de los materiales innovadores para el impacto ambiental o la eficiencia del uso de recursos. A continuación, los otros materiales seleccionados para esta evaluación fueron los siguientes.

- El concreto con adiciones minerales (ceniza de volar y escoria de alto horno), formulado a partir de la sustitución parcial del cemento por subproductos industriales de otras industrias, con lo que se consigue mejorar la durabilidad del material y disminuir la demanda de clínker.

- Concreto geopolimérico, elaborado a partir de fuentes aluminosilicatadas y activadores alcalinos, con ausencia de cemento Portland. Destaca por su baja huella de carbono, y su excelente resistencia química, aunque su aplicación masiva aún presenta los retos de la estandarización.
- Concreto con activación alcalina como el geopolimérico pero no es el mismo, con mayor libertad a la hora de escoger materias primas residuales. Se presenta como una solución intermedia factible para reducir emisiones, de forma que se vuelve más adaptable al contexto regional.

4.2.2 Comparativa cualitativa de las propiedades mecánicas y ambientales de los materiales

En atención a conseguir una valoración criteriosamente clara y objetiva, se optó por estructurar la información medioambiental y técnica de los materiales seleccionados en función de los criterios preestablecidos de: impacto ambiental, emisiones de carbono, consumo energético, comportamiento estructural, durabilidad, eficiencia en el uso de recursos y reciclabilidad. Dicha estructuración busca crear una base de datos estandarizada que permita, de un lado, la comparación de los propios materiales y, del otro, su posterior evaluación a partir de las metodologías multicriterio.

La información se estructuró en forma de una base de datos técnica compuesta por valores representativos recogidos de fuentes secundarias comprobables (EPD, literatura científica reciente, normas técnicas o fichas técnicas de fabricantes). La base no pretende ofrecer datos

absolutos sino rangos de comparación entre materiales que permitan la identificación de tendencias generales y el análisis cualitativo posterior. En efecto, esta actividad corresponde de forma clara a la creación de una base de datos estructurada como establece la planificación del segundo objetivo específico.

A fin de contraponer los materiales e incluso para poder sustentar metodológicamente el análisis, se elaboró una matriz de carácter cualitativo a partir de los criterios definidos con anterioridad. Para construir esta matriz, se ha recurrido a información sustentable que se obtiene a partir de fuentes secundarias de verificación tal como pueden ser las Declaraciones Ambientales de Producto (EPD), normas de referencia (ASTM e ISO), artículos científicos y las fichas técnicas de productos existentes en el mercado. La base de datos generada no pretende dar lugar a la obtención de valores absolutos, sino que se ha buscado ofrecer una comparación aproximativa entre las alternativas de acuerdo a rangos técnicos.

Para poder estandarizar la interpretación del resultado se han definido categorías cualitativas para cada uno de los criterios evaluados: bajo, medio y alto que se explicitan en la tabla que se reporta a continuación:

Tabla 3*Matriz comparativa de criterios de sostenibilidad*

Criterio	Concreto Portland	Con adiciones minerales	Geopolimérico	Activación alcalina
Impacto ambiental	Alto	Medio	Bajo	Bajo
Huella de carbono	Alta	Media	Muy baja	Baja
Consumo energético	Alto	Medio	Medio	Medio
Desempeño estructural	Alto	Alto	Alto	Alto
Durabilidad	Media	Alta	Alta	Alta
Uso de recursos reciclados	Bajo	Medio	Alto	Medio-alto
Potencial de reciclabilidad	Bajo	Medio	Alto	Alto

Con esta clasificación, se establece la matriz comparativa de los materiales, la cual se presenta en la tabla.

Tabla 4*Criterios para interpretación cualitativa*

Criterio	Bajo	Medio	Alto
Impacto ambiental	Emisiones CO ₂ -eq < 300 kg/m ³	Entre 300 – 600 kg/m ³	> 600 kg/m ³
Huella de carbono	Menor a 1000 kg CO ₂ -eq/ciclo de vida	Entre 1000 – 2000 kg CO ₂ -eq	Mayor a 2000 kg CO ₂ -eq
Consumo energético	< 2000 MJ/m ³	Entre 2000 – 3500 MJ/m ³	> 3500 MJ/m ³
Desempeño estructural	Resistencia ≥ 35 MPa	Entre 25 y 35 MPa	< 25 MPa (no estructural)
Durabilidad	Vida útil estimada < 30 años o alta permeabilidad	Entre 30 y 60 años	> 60 años, alta resistencia química, baja permeabilidad
Uso de reciclados	< 10% de contenido reciclado o subproducto industrial	Entre 10% – 30%	> 30% de reemplazo por residuos o subproductos
Reciclabilidad	Difícilmente reciclable sin tratamiento intensivo	Parcialmente reciclable con procesos intermedios	Alta posibilidad de reciclaje directo o con bajo procesamiento

4.2.3 Análisis comparativo

Considerando la información organizada en la base de datos estructurada se llevó a cabo una comparación cualitativa entre los materiales, atendiendo a sus propiedades mecánicas, a su comportamiento ambiental, a su durabilidad, siendo este análisis cualitativo donde encontramos las siguientes apreciaciones.

Diferencias significativas entre los materiales, las cuales, además de ser relevantes, nos marcan una tendencia general más que nada la presentación de datos numéricos precisos ya que existía un contexto de diversidad en las fuentes y las condiciones bajo las cuales fueron obtenidos los registros. La comparación en cuestión debe ser considerada en atención a la actividad dos del objetivo específico, es decir, en la comparación cualitativa entre materiales innovadores y materiales tradicionales.

El concreto convencional, si bien es un material ampliamente validado y anclado en la industria, presenta importantes desventajas medioambientales. En primer lugar, su producción conlleva una emisión muy importante de gases de efecto invernadero, sobre todo por la calcinación de caliza que implica la fabricación del cemento Portland. Otro aspecto es la elevadísima cantidad de energía que se consume en su elaboración y que hace que su reciclabilidad sea limitada. A pesar de tales desventajas, su comportamiento estructural es estable; su durabilidad, en función de las condiciones de exposición y por consiguiente, del mantenimiento adecuado, es también aceptable.

El concreto con adiciones minerales como la escoria de alto horno o la ceniza volante logra reducir considerablemente el impacto ambiental, al sustituir parte del cemento por subproductos industriales, lo que permite alcanzar una menor huella de carbono y un uso más eficiente de la energía. Este tipo de concreto mejora la durabilidad, en particular cuando se trata de ataques químicos y la penetración de cloruros, sin por ello comprometer las propiedades

mecánicas del concreto. Se establece así una solución de transición entre el concreto convencional y las formulaciones más disruptivas.

El concreto geopolimérico destaca como una de las alternativas más sostenibles en lo que respecta al impacto ambiental. Al prácticamente eliminar el cemento de tipo Portland, se obtiene la reducción de las emisiones de CO₂ asociadas a su producción. También se implican alta resistencia química y térmica y una durabilidad mejorada en condiciones sobreagresivas. Su generalización no obstante, aún enfrente barreras como la disponibilidad local de recursos naturales; el tratamiento de los activadores alcalinos, así como la falta de normativas específicas en algunos contextos.

Por último, el concreto -con activación alcalina- se establece como una alternativa intermedia entre el concreto geopolimérico y el concreto con adiciones minerales, ya que a pesar de que revive algunos de los principios del primero, su flexibilidad en términos de materias primas le permiten adaptarse a los contextos típicos en los que se pueden encontrar industrialmente. Presenta emisiones de carbono y consumo energético bastante inferiores al concreto convencional y, en términos de su comportamiento estructural, puede igualar o incluso superar aquellas que son exigidas por norma, pero requiere de una mayor estandarización en los procesos de dosificación y evaluación.

4.3 Diseño de una metodología de evaluación que permita analizar y comparar la sostenibilidad de materiales cementantes alternativos, integrando los criterios y esquemas

de clasificación definidos, con el propósito de proporcionar una herramienta útil para la toma de decisiones en la industria de la construcción.

Una vez definidos los criterios de valoración y realizada la correspondiente comparación entre los materiales seleccionados, el siguiente paso es diseñar una metodología estructurada que permita evaluar de forma holística el nivel de sostenibilidad. Este capítulo tiene por objeto cumplir con el tercer objetivo específico del proyecto: Diseñar una metodología para la evaluación de sostenibilidad de los materiales innovadores aplicados al concreto, basada en criterios preestablecidos y ponderaciones asignadas en función de su importancia.

El diseño de la metodología pretende la combinación de los criterios técnicos y ambientales reconocidos con un sistema de toda claridad y reproducible de valoraciones, de tal modo que las alternativas sean jerarquizadas y la toma de decisiones en contextos de las edificaciones se vea potenciada. Para ello se recurre a la evaluación multicriterio, si bien es necesario complementar este enfoque con una matriz de ponderación a partir de la cual se puedan asignar pesos relativos a los criterios en función de su importancia para el análisis de sostenibilidad.

4.3.1 Enfoque metodológico

La metodología planteada para la determinación de la sostenibilidad de los nuevos materiales en el hormigón se fundamenta en el uso de un enfoque multicriterio de tipo cualitativo

con ponderación relativa, ya que permite integrar diversas variables ambientales y técnicas en una única matriz de valoración. Este enfoque corresponde a la posibilidad de contar con un procedimiento de comparación de las diferentes alternativas, haciendo una ponderación relativa de cada uno de los criterios según su importancia para el análisis global. El método se articula a través de las tres etapas principales.

4.3.1.1 Valoración cualitativa de cada uno de los materiales frente a cada uno de los criterios. Mediante la matriz elaborada en el precedente capítulo, se asignan valores de carácter cualitativo (alto, medio, bajo) a cada uno de los siete criterios de evaluación, los cuales quedan previamente definidos en su tabla de rangos interpretativos, lo que permite asegurar la unificación de la asignación y, asimismo, traducir el comportamiento técnico y ambiental de los materiales en términos evaluativos.

4.3.1.2 Asignación de las ponderaciones de los criterios. No todos los criterios tienen el mismo valor en lo relativo a su contribución a la sostenibilidad general del material, así, se utilizará una ponderación relativa de los mismos, para que su relevancia en la propia análisis quede reflejada por lo cual esta se propone a partir de la literatura especializada, recomendaciones de normas como la ISO 21929 (sostenibilidad en construcción), así como criterios de especialistas en la materia. La distribución propuesta sería la siguiente:

Tabla 5

Distribución de porcentaje de ponderación.

Criterio	Ponderación (%)
Impacto ambiental	20%
Huella de carbono	20%
Consumo energético	15%
Desempeño estructural	15%
Durabilidad	15%
Uso de recursos reciclados	10%
Reciclabilidad	5%

4.3.1.3 Cálculo del índice de sostenibilidad. Para cada valor cualitativo, se le asigna un puntaje (bajo=1; medio=2; alto=3) y multiplicamos ese puntaje por su correspondiente ponderación dada para cada criterio. La suma de los productos obtenidos para cada uno de ellos da un índice de sostenibilidad, ponderado para cada material, que presenta sus resultados en un intervalo de 1 a 3. Este índice da pie a organizar y clasificar los materiales en función de su desempeño sostenible, lo que permite orientar los procesos de selección técnica.

4.3.2 Aplicación de la metodología

Para validar la funcionalidad de la metodología desarrollada, se aplicó el esquema de evaluación multicriterio a los 4 tipos de concretos analizados anteriormente. El procedimiento

utilizado en este caso fue el de atribuir a cada uno de los criterios un valor cualitativo (de acuerdo con la matriz comparativa del punto 4.2.2), traducirlo a una escala numérica y ponderarla según la tabla de pesos establecidos en el apartado anterior.

La equivalencia de valores cualitativos fue:

- Alto = 3 puntos
- Medio = 2 puntos
- Bajo = 1 puntos

A continuación, se presenta el cálculo del índice de sostenibilidad para cada uno de los materiales:

Tabla 6

Evaluación de sostenibilidad

Criterio	Peso (%)	Portland	Minerales	Geopolimérico	Alcalino
Impacto ambiental	20%	$1 \times 0.20 = 0.20$	$2 \times 0.20 = 0.40$	$3 \times 0.20 = 0.60$	$3 \times 0.20 = 0.60$
Huella de carbono	20%	$1 \times 0.20 = 0.20$	$2 \times 0.20 = 0.40$	$3 \times 0.20 = 0.60$	$3 \times 0.20 = 0.60$
Consumo energético	15%	$1 \times 0.15 = 0.15$	$2 \times 0.15 = 0.30$	$2 \times 0.15 = 0.30$	$2 \times 0.15 = 0.30$

Desempeño estructural	15%	$3 \times 0.15 = 0.45$	$3 \times 0.15 = 0.45$	$3 \times 0.15 = 0.45$	$3 \times 0.15 = 0.45$
Durabilidad	15%	$2 \times 0.15 = 0.30$	$3 \times 0.15 = 0.45$	$3 \times 0.15 = 0.45$	$3 \times 0.15 = 0.45$
Uso de recursos reciclados	10%	$1 \times 0.10 = 0.10$	$2 \times 0.10 = 0.20$	$3 \times 0.10 = 0.30$	$2.5 \times 0.10 = 0.25$
Potencial de reciclabilidad	5%	$1 \times 0.05 = 0.05$	$2 \times 0.05 = 0.10$	$3 \times 0.05 = 0.15$	$3 \times 0.05 = 0.15$

Sumados los resultados de cada valoración, se presenta en la siguiente tabla los resultados correspondientes:

Tabla 7

Resultado de evaluación final.

Material	Índice total (máx 3.0)
Concreto Portland	1.45
Concreto con minerales	2.30
Geopolimérico	2.85
Activación alcalina	2.80

Los resultados que hemos obtenido demuestran que los concretos geopoliméricos y los concretos con activación alcalina muestran los índices más altos de sostenibilidad comparados con el concreto Portland, siendo muy superiores a este último. El concreto con adiciones minerales será la opción de transición adecuada, ya que el concreto tradicional presenta debilidades importantes respecto a criterios ambientales y de reciclabilidad.

5. Conclusiones

El diseño de un método que se proponía en este capítulo constituye un método organizado, reproducible y válido para la evaluación de la sostenibilidad de los materiales innovadores aplicados al concreto. A partir de criterios predefinidos, y apoyados en las normativas internacionales, se llegó a un método multicriterio ponderado que permite combinar las variables ambientales, técnicas y funcionales en un único índice de comparación.

La metodología se distingue, en la facilidad operativa e incluso en el hecho de que se puede aplicar en situaciones reales utilizando información cuantitativa o cualitativa, con límites interpretativos claros y aplicando ponderaciones según la consideración de cada criterio, el modelo representa una herramienta equilibrada en relación al rigor técnico y la aplicación práctica, lo que es especialmente importante en situaciones en las que los datos técnicos son escasos y dispersos.

La validación de la metodología de la aplicación en cuatro tipos de concretos —Portland, con adiciones minerales, geopolimérico y con activación alcalina— recalca su capacidad para priorizar alternativas fundamentadas en criterios sostenibles. Los resultados, aventajados por las tendencias documentadas en la literatura técnica, mostraron además la oportunidad de visualizar las ventajas reales que ofrecen los nuevos materiales en términos de reducción de impactos, aprovechamiento de residuos y de aumentar la durabilidad.

6. Recomendaciones

Se recomienda que la metodología desarrollada sea aplicada en proyectos piloto de infraestructura dentro del contexto colombiano, particularmente en aquellos que se ejecuten en regiones con alta demanda de obras civiles. Esto permitirá validar su aplicabilidad práctica y generar información empírica que complemente los resultados teóricos obtenidos. La implementación progresiva en escenarios reales facilitará la identificación de limitaciones, ajustes necesarios y ventajas competitivas frente al uso del concreto convencional. Asimismo, estos proyectos piloto podrían convertirse en referentes nacionales para la adopción de materiales innovadores que reduzcan la huella de carbono y fortalezcan la sostenibilidad del sector de la construcción.

Es aconsejable que universidades, gremios de la construcción y entidades gubernamentales promuevan procesos de formación y capacitación en torno al uso de materiales cementantes alternativos, tales como los geopolímeros, cementos con activación alcalina y adiciones puzolánicas. La difusión de conocimiento técnico actualizado permitirá que ingenieros, arquitectos y constructores estén preparados para enfrentar los retos de la sostenibilidad en sus proyectos. Igualmente, el fortalecimiento de estas competencias contribuirá a derribar las barreras culturales y de desconocimiento que dificultan la implementación de nuevos materiales, incentivando así la innovación y la modernización en la industria de la construcción.

Referencias

- Abbass, M., Singh, D., & Singh, G. (2021). Properties of hybrid geopolymer concrete prepared using rice husk ash, fly ash and GGBS with coconut fiber. *Materials Today: Proceedings*, 45(6), 4964–4970. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.390>
- Abousnina, R., Alsalmi, H. I., Manalo, A., Allister, R. L., Alajarmeh, O., Ferdous, W., & Jlassi, K. (2021). Effect of short fibres in the mechanical properties of geopolymer mortar containing oil-contaminated sand. *Polymers*, 13(17), 1–19. <https://doi.org/10.3390/polym13173008>
- Alfonso, D., Dugarte, M., Carrillo, J., & Arteta, C. A. (2024). Effect of aggregate type on the elastic modulus and compressive behavior of concrete: A case study in Colombia. *Construction and Building Materials*, 411, 134131. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134131>
- Al-Obaidi, S., Bamonte, P., Ferrara, L., Luchini, M., & Mazzantini, I. (2020). Durability-based design of structures made with ultra-high-performance/ultra-high-durability concrete in extremely aggressive scenarios: Application to a geothermal water basin case study. *Infrastructures*, 5(11), 102. <https://doi.org/10.3390/infrastructures5110102>
- Amin, M., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., & Saad Agwa, I. (2022). Effect of ferrosilicon and silica fume on mechanical, durability, and microstructure characteristics of ultra high-performance concrete. *Construction and Building Materials*, 320, 126233. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126233>

- Arabi, N., Jaubertie, R., Chelghoum, N., & Molez, L. (2015). Formation of C-S-H in calcium hydroxide–blast furnace slag–quartz–water system in autoclaving conditions. *Advances in Cement Research*, 27(3), 153–162. <https://doi.org/10.1680/adcr.13.00069>
- Asghar, R., Khan, M. A., Alyousef, R., Javed, M. F., & Ali, M. (2023). Promoting the green construction: Scientometric review on the mechanical and structural performance of geopolymers concrete. *Construction and Building Materials*, 368, 130502. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130502>
- Boxley, C., Nair, B., & Balaguru, P. (2008). Practical applications of geopolymers. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 28(9), 321–336. <https://doi.org/10.1002/9780470339621.ch45>
- Bunea, G., Alexa-Stratulat, S.-M., Mihai, P., & Toma, I.-O. (2023). Use of clay and titanium dioxide nanoparticles in mortar and concrete: A state-of-the-art analysis. *Coatings*, 13(3), 506. <https://doi.org/10.3390/coatings13030506>
- Burris, L. E., Alapati, P., Moser, R. D., Ley, M. T., Berke, N., & Kurtis, K. E. (2015). Alternative cementitious materials: Challenges and opportunities. *ACI Special Publication*, 305, 27.1–27.10. <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal.aspx?m=details&i=51593092>
- Carlsen, L., & Bruggemann, R. (2022). The 17 United Nations’ sustainable development goals: A status by 2020. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 29(3), 219–229. <https://doi.org/10.1080/13504509.2021.1955222>

- Cassar, L. (2004). Photocatalysis of cementitious materials: Clean buildings and clean air. *MRS Bulletin*, 29(5), 328–331. <https://doi.org/10.1557/mrs2004.99>
- Chen, Y., He, S., Gan, Y., Çopuroğlu, O., Veer, F., & Schlangen, E. (2022). A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*, 45, 103599. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103599>
- Chitty, W.-J., Dillmann, P., L'Hostis, V., & Lombard, C. (2005). Long-term corrosion resistance of metallic reinforcements in concrete: A study of corrosion mechanisms based on archaeological artefacts. *Corrosion Science*, 47(6), 1555–1581. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.07.032>
- Czarnecki, L. (2007). Concrete-polymer composites: Trends shaping the future. *International Journal of the Society of Material Engineering for Resources*, 15(1), 1–5. <https://doi.org/10.5188/ijsmr.15.1>
- D'Alessandro, A., Fabiani, C., Pisello, A. L., Ubertini, F., Materazzi, A. L., & Cotana, F. (2017). Innovative concretes for low-carbon constructions: A review. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 12(3), 289–309. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctx009>
- De Matteis, V., Cannavale, A., Coppola, A., & Fiorito, F. (2017). Nanomaterials and smart nanodevices for modular dry constructions: The project “Easy House.” In L. Ding, F. Fiorito, & P. Osmond (Eds.), *Procedia Engineering* (Vol. 180, pp. 704–714). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.230>

- Dhir, R. K., McCarthy, M. J., Caliskan, S., & Ashraf, M. K. (2009). Concrete pressure on formwork: Influence of cement combinations and superplasticising admixtures. *Magazine of Concrete Research*, 61(6), 407–417. <https://doi.org/10.1680/mac.2008.00031>
- Di Prisco, M., Plizzari, G., & Vandewalle, L. (2009). Fibre reinforced concrete: New design perspectives. *Materials and Structures*, 42(9), 1261–1281. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4>
- Dinakar, P. (2011). High reactive metakaolin for high strength and high performance concrete. *Indian Concrete Journal*, 85(4), 28–34.
- Eguchi, K., Takewaka, K., Yamaguchi, T., & Ueda, N. (2013). A study on durability of blast furnace slag cement concrete mixed with metakaolin-based artificial pozzolan in actual marine environment. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies* (pp. 1–10).
- Ekr, J., Caldova, E., Vymlatil, P., Wald, F., & Kuklikova, A. (2018). Timber steel-fibre-reinforced concrete floor slabs subjected to fire. *European Journal of Wood and Wood Products*, 76(1), 201–212. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1221-8>
- Esparham, A., Vatin, N. I., Kharun, M., & Hematibahar, M. (2023). A study of modern eco-friendly composite (geopolymer) based on blast furnace slag compared to conventional concrete using the life cycle assessment approach. *Infrastructures*, 8(3), 58. <https://doi.org/10.3390/infrastructures8030058>
- Feng, C., Xu, D., Cheng, H., Yan, P., Wan, F., & Yan, W. (2024). Preparation and properties of silica fume@polyurethane urea cement composites. *Materials Research Express*, 11(3), 035009. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ad1ef9>

- Fiat, D., Lazar, M., Baciú, V., & Hubca, G. (2012). Superplasticizer polymeric additives used in concrete. *Materiale Plastice*, 49(1), 62–67.
- Galan-Marin, C., Rivera-Gomez, C., & Garcia-Martinez, A. (2016). Use of natural-fiber bio-composites in construction versus traditional solutions: Operational and embodied energy assessment. *Materials*, 9(6), 465. <https://doi.org/10.3390/ma9060465>
- Grove, J., Vanikar, S., & Wathne, L. (2011). Sustainability opportunities for concrete pavements. *Indian Concrete Journal*, 85(3), 7–15.
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., & Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Han, M., & Tan, M. H. Y. (2017). Optimal robust and tolerance design for computer experiments with mixture proportion inputs. *Quality and Reliability Engineering International*, 33(8), 2255–2267. <https://doi.org/10.1002/qre.2188>
- High-strength concrete (ACI 363R): By ACI Committee 363. (2005). *ACI Special Publication, SP-228*, 79–80. American Concrete Institute.
- Hooton, R. D., Sutter, L., & Christiansen, M. (2017). Development of test methods and specifications for chemically activated binders. *ACI Special Publication*, 320, 449–460. American Concrete Institute.
- Hussain, H. K., Zhang, L. Z., & Liu, G. W. (2013). An experimental study on strengthening reinforced concrete T-beams using new material polyurethane–cement (PUC).

Construction and Building Materials, 40, 104–117.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.088>

International Conference on Chemical Sciences and Engineering: Advance and New Materials (ICCSE 2018). (2019). *Materials Today: Proceedings*, 19, 1–5.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.001>

Jackson, M. D., Oleson, J. P., Moon, J., Zhang, Y., Chen, H., & Gudmundsson, M. T. (2018).

Extreme durability in ancient Roman concretes. *American Ceramic Society Bulletin*, 97(5), 22–28.

Jamaludin, L., Razak, R. A., Abdullah, M. M. A. B., Vizureanu, P., Bras, A., Imjai, T., Sandu, A.

V., Abd Rahim, S. Z., & Yong, H. C. (2022). The suitability of photocatalyst precursor materials in geopolymer coating applications: A review. *Coatings*, 12(9), 1348.

<https://doi.org/10.3390/coatings12091348>

Jan, E., Hendricks, J. L., Husaini, V., Richardson-Burns, S. M., Sereno, A., Martin, D. C., &

Kotov, N. A. (2009). Layered carbon nanotube–polyelectrolyte electrodes outperform traditional neural interface materials. *Nano Letters*, 9(12), 4012–4018.

<https://doi.org/10.1021/nl902187z>

Jianu, N. R., Moga, I. C., Pricop, F., & Chivoiu, A. (2018). Wastewater sludge used as material for bricks fabrication. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374,

012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012061>

Kathirvel, M., Sowndharya, D., & Sudharson, K. (2019). Experimental investigation on strength properties of concrete using polypropylene pellets. *International Research Journal of*

Multidisciplinary Technovation, 1(6), 509–516. <https://doi.org/10.34256/irjmtcon73>

- Kumar, P., & Singh, N. (2023). The performance of green self-compacting concrete using industrial wastes. In *Cement and concrete: Design, performance and structure* (pp. 1–43). Nova Science Publishers.
- Kumara, G. D., Sivapullaiah, P. V., & Sreenivasa Murthy, A. (2023). Performance evaluation of sugar cane bagasse ash on the strength of concrete: A sustainable approach. *Materials Today: Proceedings*, 75, 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.335>
- Lankard, D. R. (1972). Steel fibres in mortar and concrete. *Composites*, 3(2), 65–70. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(72\)90377-1](https://doi.org/10.1016/0010-4361(72)90377-1)
- Lataste, J. F., Behloul, M., & Breysse, D. (2008). Characterisation of fibre distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *NDT & E International*, 41(8), 638–647. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.03.008>
- Lăzărescu, A., Szilagyi, H., Ioani, A., & Baeră, C. (2018). Parameters affecting the mechanical properties of fly ash-based geopolymer binders: Experimental results. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 374, 012035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012035>
- Leemann, A., Winnefeld, F., Münch, B., & Tiefenthaler, J. (2023). Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates and its implications for the production of recycling concrete. *Journal of Building Engineering*, 79, 107779. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107779>
- Li, V. (2009). Self-healing concrete repairs cracks, maintains strength. *Materials Performance*, 48(6), 20–22.

- Majidi, B. (2009). Geopolymer technology: From fundamentals to advanced applications: A review. *Materials Technology*, 24(2), 79–87. <https://doi.org/10.1179/175355509X449355>
- Marczyk, J., Ziejewska, C., Gadek, S., Korniejenko, K., Łach, M., Góra, M., Kurek, I., Dogan-Saglamtimur, N., Hebda, M., & Szechynska-Hebda, M. (2021). Hybrid materials based on fly ash, metakaolin, and cement for 3D printing. *Materials*, 14(22), 6874. <https://doi.org/10.3390/ma14226874>
- Marvila, M. T., De Azevedo, A. R. G., De Matos, P. R., Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2021). Materials for production of high and ultra-high performance concrete: Review and perspective of possible novel materials. *Materials*, 14(15), 4304. <https://doi.org/10.3390/ma14154304>
- Mavi, R. K., Gengatharen, D., Mavi, N. K., Hughes, R., Campbell, A., & Yates, R. (2021). Sustainability in construction projects: A systematic literature review. *Sustainability*, 13(4), 1932. <https://doi.org/10.3390/su13041932>
- Mehdizadeh, H., Wu, Y., Mo, K. H., & Ling, T.-C. (2023). Evaluation of carbonation conversion of recycled concrete fines using high-temperature CO₂: Reaction kinetics and statistical method for parameters optimization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109796. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109796>
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais* (2.^a ed.). IBRACON.
- Moghayedi, A., Phiri, C., & Ellmann, A.-M. (2023). Improving sustainability of affordable housing using innovative technologies: Case study of SIAH-Livable. *Scientific African*, 21, e01819. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01819>

- Noushini, A., Aslani, F., Castel, A., Gilbert, R. I., Uy, B., & Foster, S. (2016). Compressive stress–strain model for low-calcium fly ash-based geopolymer and heat-cured Portland cement concrete. *Cement and Concrete Composites*, 73, 136–146.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.004>
- Occhicone, A., Vukčević, M., Bosković, I., Mingione, S., & Ferone, C. (2022). Alkali-activated red mud and construction and demolition waste-based components: Characterization and environmental assessment. *Materials*, 15(4), 1617. <https://doi.org/10.3390/ma15041617>
- Pane, I., Imran, I., & Budiono, B. (2018). Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with a variable of sodium hydroxide (NaOH) solution molarity. *MATEC Web of Conferences*, 147, 01004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814701004>
- Pavlović, A., Farcas, C., Galao, O., Navarro, R., Zornoza, E., Baeza, F. J., Moral, B., Pla, R., & Garcés, P. (2021). Life cycle assessment of a concrete road: Opportunities for improvement via utilising intelligent bulk materials. In *Proceedings of the fib Symposium 2021* (pp. 1950–1960).
- Pomianowski, M., & Jensen, R. L. (2019). Heat storage in concrete deck with nano- and micro-encapsulated PCM. In F. Pacheco-Torgal, V. M. John, & J. Labrincha (Eds.), *Smart nanoconcretes and cement-based materials: Properties, modelling and applications* (pp. 313–331). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817854-6.00013-1>
- Rahbar, N. (2020). Extending the life of self-healing structural materials. *Matter*, 2(2), 289–291.
<https://doi.org/10.1016/j.matt.2020.01.012>

- Ransinchung, R. N. G. D., & Kumar, B. (2010). Investigations on pastes and mortars of ordinary Portland cement admixed with wollastonite and microsilica. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(4), 305–313. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000019](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000019)
- Rashad, A. M. (2013). Metakaolin as cementitious material: History, sources, production and composition: A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*, 41, 303–318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>
- Rispoli, C., De Bonis, A., Guarino, V., Graziano, S. F., Di Benedetto, C., Esposito, R., Morra, V., & Cappelletti, P. (2019). The ancient pozzolanic mortars of the thermal complex of Baia (Campi Flegrei, Italy). *Journal of Cultural Heritage*, 40, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.05.010>
- Rong, X., Liu, J., Chen, P., Li, Y., & Wang, Z. (2024a). Effect of silica nanoparticles on high-temperature mechanical properties of sea sand alkali-activated slag cementitious materials. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 52(2), 652–660. <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.20230355>
- Rong, X., Liu, J., Chen, P., Li, Y., & Wang, Z. (2024b). Effect of silica nanoparticles on high-temperature mechanical properties of sea sand alkali-activated slag cementitious materials. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 52(2), 652–660. <https://doi.org/10.14062/j.issn.0454-5648.20230355>
- Rushing, T. S., Al-Chaar, G., Eick, B. A., Burroughs, J., Shannon, J., Barna, L., & Case, M. (2017). Investigation of concrete mixtures for additive construction. *Rapid Prototyping Journal*, 23(1), 74–80. <https://doi.org/10.1108/RPJ-09-2015-0124>

- Sabão, M., Ayala Rueda, C. I., Salas Barraza, J. F., Núñez Vivas, J. E., & Cardona Almeida, C. A. (2018). The incidence of alternative minimum load values in masonry partition and lightweight partition systems with a cost analysis in Barranquilla, Colombia. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00194. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00194>
- Salas, D. A., Ramirez, A. D., Rodríguez, C. R., Petroche, D. M., Boero, A. J., & Duque-Rivera, J. (2016). Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 113, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.078>
- Salguero, F., Grande, J. A., Valente, T., Garrido, R., De La Torre, M. L., Fortes, J. C., & Sánchez, A. (2014). Recycling of manganese gangue materials from waste-dumps in the Iberian Pyrite Belt: Application as filler for concrete production. *Construction and Building Materials*, 54, 363–368. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.082>
- Salmi, A. (2024). Enhancing durability and sustainability in concrete with fibre-reinforced composites. *Journal of Water and Land Development*, 2024(1), 48–54. <https://doi.org/10.24425/jwld.2024.149158>
- Salvo, M., Rizzo, S., Caldirola, M., Novajra, G., Canonico, F., Bianchi, M., & Ferraris, M. (2015). Biomass ash as supplementary cementitious material (SCM). *Advances in Applied Ceramics*, 114(sup1), S3–S10. <https://doi.org/10.1179/1743676115Y.0000000043>
- Samui, P., Kim, D., Iyer, N., & Chaudhary, S. (2020). New materials in civil engineering. In *New materials in civil engineering* (pp. 937–966). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00032-6>

- Selyutina, N., & Smirnov, I. (2023). Dynamic fractures of concrete made of recycled aggregate or reinforced with fibres. *Mechanics of Materials*, 179, 104613.
<https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2023.104613>
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and Concrete Research*, 114, 49–56.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.017>
- Simatupang, P. H., Andreas, A., & Nugraha, A. (2019). The long-term effects of nano-silica on concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 508(1), 012038.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/508/1/012038>
- Sivakrishna, A., Adesina, A., Awoyera, P. O., & Kumar, K. R. (2020). Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 27, 54–58.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.202>
- Sofos, F., Papakonstantinou, C. G., Valasaki, M., & Karakasidis, T. E. (2023). Fiber-reinforced polymer confined concrete: Data-driven predictions of compressive strength utilizing machine learning techniques. *Applied Sciences*, 13(1), 567.
<https://doi.org/10.3390/app13010567>
- Srinivas, D., Dey, D., Panda, B., & Sitharam, T. G. (2022). Printability, thermal and compressive strength properties of cementitious materials: A comparative study with silica fume and limestone. *Materials*, 15(23), 8531. <https://doi.org/10.3390/ma15238607>
- Sun, Y., Yu, R., Shui, Z., Gao, X., Zheng, L., Qian, D., & Huang, J. (2020). A metakaolin-based slurry additive for marine concrete: Preparation and properties evaluation. *Journal of Testing and Evaluation*, 48(3), 1788–1798. <https://doi.org/10.1520/JTE20190136>

- Susilorini, R. M. I. R., Iskandar, I., & Santosa, B. (2022). Long-term durability of bio-polymer modified concrete in tidal flooding prone area: A challenge of sustainable concrete materials. *Sustainability*, 14(3), 1565. <https://doi.org/10.3390/su14031565>
- Tang, Z., Li, W., Tam, V. W. Y., & Luo, Z. (2020). Investigation on dynamic mechanical properties of fly ash/slag-based geopolymeric recycled aggregate concrete. *Composites Part B: Engineering*, 185, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107776>
- Teixeira, A. H. C., Junior, P. R. R. S., Silva, T. H., Barreto, R. R., & da Silva Bezerra, A. C. (2020). Low-carbon concrete based on binary biomass ash-silica fume binder to produce eco-friendly paving blocks. *Materials*, 13(7), 1534. <https://doi.org/10.3390/ma13071534>
- Trocónis de Rincón, O. M., Sánchez, M., Millano, V., Fernández, R., De Partidas, E. A., Martínez, I., Rebolledo, N., Barboza, M., Montenegro, J. C., Vera, R., Carvajal, A. M., De Gutiérrez, R. M., Maldonado, J., Guerrero, C., Saborio-Leiva, E., Villalobos-Gonzalez, C., Pérez-Quiroz, J. T., Torres-Acosta, A., Castro-Borges, P., ... Derrégibus, M. (2011). Concrete carbonation in Ibero-American countries DURACON project: Six-year evaluation. In *18th International Corrosion Congress 2011* (Vol. 1, pp. 466–478). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84867267303>
- Wang, Q., Ma, Y., Li, C., Hu, Z., Lv, H., Zhang, J., & Meng, X. (2023). Preparation and application research of hybrid alkali-resistant glass fiber reinforced cement grout. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02674. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02674>

- Yaman, I. O., & Alam, B. (2022). Nano-tailored high-performance fiber-reinforced cementitious composites. In *Recent advances in nano-tailored multi-functional cementitious composites* (pp. 67–102). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85229-6.00010-X>
- Yang, Z. X., Hwang, K. H., Kim, M. C., Yang, J. Y., & Lim, S. K. (2010). Strength enhancement of geopolymer-based concretes by mixed alkaline activators. *Materials Science Forum*, 658, 292–295. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.658.292>
- Yehia, S., Abudayyeh, O., Bhusan, B., Maurovich, M., & Zalt, A. (2009). Self-consolidating concrete mixture with local materials: Proportioning and evaluation. In *Concrete materials: Properties, performance and applications* (pp. 325–347). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84896227491>
- Yelton, R. (2006). Greening cement your way. *Concrete Producer*, 24(7), 22. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33748282930>
- Yepes, V., Martí, J. V., & García-Segura, T. (2015). Cost and CO2 emission optimization of precast–prestressed concrete U-beam road bridges by a hybrid glowworm swarm algorithm. *Automation in Construction*, 49, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.10.006>
- Zakrevskaya, L., Handelsman, I., & Provatorova, G. (2018). The effect of modification of binders on technological and operational properties of composite construction materials. *MATEC Web of Conferences*, 245, 03017. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824503017>
- Zhang, B., Yu, J., Chen, W., Chen, J., Li, H., & Niu, J. (2024). Interface shear failure behavior between normal concrete (NC) and ultra-high performance concrete (UHPC).

International Journal of Concrete Structures and Materials, 18(1), 1–15.

<https://doi.org/10.1186/s40069-023-00657-6>

Zong, Z., Zhang, Q., Liu, Y., Guo, Z., Lin, S., & Jiang, T. (2023). Carbonation resistance of sustainable self-compacting concrete with recycled concrete aggregate and fly ash, slag, and silica fume. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2295536>