

Materiales alternativos como reemplazo de agregados grueso y fino en la producción de
compuestos cementicios a nivel mundial

Olga Beatriz León Cristancho y Cristian Ortiz Sanmiguel

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero Civil

Director

Luis Eduardo Zapata Orduz

PhD. en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander.

Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios, por darnos la bendición de vivir y culminar esta etapa.

A nuestras familias, por ser el motor y la motivación de todos los días para seguir adelante.

Agradecimientos

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por proporcionar los recursos y el entorno propicio para llevar a cabo este estudio.

Nuestro agradecimiento se extiende a los profesores, quienes generosamente compartieron sus conocimientos y ofrecieron valiosas perspectivas que enriquecieron mi trabajo. Especialmente a nuestro director de tesis, por su orientación experta, paciencia y apoyo constante a lo largo de este proyecto. Sus valiosos comentarios y sugerencias fueron fundamentales para dar forma a esta investigación.

Agradecemos a nuestra familia y amigos por su apoyo inquebrantable a lo largo de este viaje académico. Sus palabras de aliento y comprensión fueron un impulso fundamental en los momentos más desafiantes.

Este logro no habría sido posible sin la ayuda y aliento de todas estas personas y la institución. Gracias por su contribución a nuestro desarrollo académico y profesional.

Contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema y justificación.....	10
2. Marco teórico.....	12
2.1 Antecedentes.....	13
2.1.1 Historia del uso de materiales alternativos en compuestos cementicios.....	13
2.1.2 Estudios previos sobre la eficacia de materiales alternativos como agregados.....	15
2.2 Concreto.....	19
2.2.1 Trabajabilidad del concreto.....	20
2.2.2 Durabilidad.....	21
2.2.3 Resistencia.....	22
2.2.4 Agregados.....	23
2.2.5 Agregados reciclados.....	24
3. Metodología.....	25
3.1 Objetivo general.....	26
3.2 Objetivos específicos.....	26
3.3 Metodología de Investigación.....	26
3.3.1 Tipos de Investigación.....	27
3.3.1.1 Tipo Descriptivo.....	27
3.3.1.2 Revisión Documental.....	27
3.3.2 Diseño de la Investigación.....	28
3.3.3 Técnicas de Recolección de Información.....	28

3.3.4 Análisis bibliográfico.....	30
3.4 Desarrollo de Primer Objetivo Específico	32
3.4.1. Agregados industriales.....	33
3.4.2 Compuestos avanzados	33
3.4.3 Alternativas de agregados en la fabricación del cemento.....	34
3.4.3.1 Materiales reciclados.	34
3.4.3.2 Materiales de la industria agrícola.	36
3.4.4 Comparativa.....	36
3.5 Desarrollo del Segundo Objetivo Específico.....	38
3.5.1. Escoria de alto horno	39
3.5.2 Cenizas volantes.....	40
3.5.3 Vidrio triturado	42
3.5.4 Polímeros reciclados	44
3.5.5 Residuos de construcción y demolición.....	46
3.5.6 Nanomateriales	48
3.6 Desarrollo del Tercer Objetivo Específico	49
4. Conclusiones	52
5. Recomendaciones	54
Referencias Bibliográficas	55

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Palabras clave más frecuentes.....	29
Tabla 2. Resumen de beneficios y usos específicos de los materiales agregados alternativos.....	37
Tabla 3. Módulo de elasticidad en diferentes tiempos de curado (GPa).	41
Tabla 4. Resistencia a la compresión de cilindros hechos en concreto con adición de vidrio triturado (MPa).....	43
Tabla 5. Reducción de la resistencia a la compresión de concreto fabricado con reemplazo de residuos de plástico frente al concreto de origen convencional a los 90 días de curado.	46

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Área temática de los artículos.....	30
Figura 2. Producción de documentos por países.....	31
Figura 3. Publicaciones por año.....	32
Figura 4. Tendencia de neumáticos desechados en Colombia, periodo 2000-2020.	36
Figura 5. Resistencia a la compresión en concreto con adición de vidrio triturado (MPa)	44
Figura 6. Resistencia a la flexo-tracción en concreto con adición de vidrio triturado (MPa).	45

Resumen

Título: Materiales alternativos como reemplazo de agregados grueso y fino en la producción de compuestos cementicios a nivel mundial.*

Autor: Olga Beatriz León Cristancho y Cristian Ortiz Sanmiguel.**

Palabras Clave: Agregados, Concreto, Cemento, Cementicios, Materiales Alternativos, Propiedades Mecánicas.

Descripción: La industria de la construcción es esencial para la sociedad, dando forma a viviendas, edificios, instalaciones médicas y más. El concreto, un material fundamental en esta industria, destaca por sus propiedades únicas. Sin embargo, su producción enfrenta desafíos por altos costos y fuerte impacto ambiental, principalmente debido a los agregados. Así, se busca hallar alternativas para sustituir estos agregados manteniendo la resistencia y facilidad de mezcla. Entre las opciones de reemplazo se encuentran escoria de alto horno, ceniza volante, vidrio triturado, nanomateriales, polímeros y fibras, teniendo en cuenta que el uso de estos depende de la calidad del material alternativo que reemplaza el agregado convencional. Este análisis subraya la importancia de investigar y explorar estos materiales, centrándose en su impacto en las propiedades mecánicas del concreto, a través de una revisión exhaustiva de la literatura disponible.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Ingeniería Civil. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. PhD. En Ingeniería Civil. Codirector: Sergio Ruiz Martínez. Ingeniero Civil.

Abstract

Title: Alternative materials as replacement for coarse and fine aggregates in cementitious compounds in a global scale.*

Author(s): Olga Beatriz León Cristancho y Cristian Ortiz Sanmiguel. ¹

Key Words: Aggregates, Concrete, Cement, Cementitious, Alternative Materials, Mechanical Properties.

Description: The construction industry is essential to society, shaping homes, buildings, medical facilities, and more. Concrete, a fundamental material in this industry, has unique properties. However, its production faces challenges due to high costs and high environmental impact, mainly due to aggregates. Alternatives are being sought to replace these aggregates while maintaining strength and ease of mixing. Replacement options include blast-furnace slag, fly ash, crushed glass, nanomaterials, polymers and fibers, taking into account that their use depends on the quality of the alternative material that replaces the conventional aggregate. This analysis highlights the importance of studying and researching these materials, focusing on their impact on the mechanical properties of concrete, through a comprehensive review of the available literature.

* Degree Work

¹Faculty of Physico-mechanical Engineering. Civil Engineering School. Civil Engineering. Director: Luis Eduardo Zapata Orduz. Codirector: Sergio Ruiz Martinez.

1. Planteamiento del problema y justificación

En la industria de la construcción moderna, los compuestos cementicios se han consolidado como materiales esenciales debido a sus sobresalientes propiedades mecánicas y durabilidad. Estos compuestos, según estudios de Acevedo Jaramillo, & Posada Franco (2019), no solo ofrecen resistencia estructural y prolongada vida útil, sino que también se han adaptado para satisfacer demandas específicas de aplicaciones arquitectónicas y estructurales. La composición de estos compuestos es primordialmente dominada por los “agregados”, que constituyen entre un 60% al 75% de su volumen total. Los agregados, de acuerdo con investigaciones realizadas por S.K., Singh, & Chourasia (2020), son materiales granulares inertes que desempeñan roles críticos en la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto, tales como su resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, durabilidad y permeabilidad.

Dada la demanda creciente de infraestructura a nivel global, se estima que se producen aproximadamente 4129 millones de toneladas de concreto anualmente (ASOCCEM, 2016). Sin embargo, esta masiva producción no está exenta de repercusiones medioambientales. De hecho, Rico Rodríguez et al (2019) han señalado que la producción de concreto ha sido una fuente considerable de afectaciones ambientales, siendo la emisión de CO_2 proveniente de la fabricación de cemento responsable del 7% de la producción total mundial de este gas de efecto invernadero. Por otra parte, el proceso de extracción y procesamiento de agregados, tanto finos como gruesos, ha llevado a una explotación intensiva de recursos naturales (Burgos Galindo et al., 2019). Esta sobreexplotación no solo amenaza la disponibilidad de estos recursos, sino que también desencadena una serie de impactos ecológicos y paisajísticos (Osorio Saraz et al 2007). Ante este

panorama, es imperativo explorar alternativas sostenibles. Diversos investigadores, como Xargay et al (2019), han propuesto la sustitución de estos recursos naturales por materiales reciclados o de origen diferente, buscando así un balance entre el avance civilizatorio y la preservación ecológica. Estas alternativas no solo buscan mitigar el impacto ambiental, sino también garantizar la viabilidad económica y técnica de la construcción en las próximas décadas.

En este sentido, la acelerada tasa de urbanización y crecimiento industrial a nivel global, la industria de la construcción enfrenta la urgente necesidad de adaptarse a un modelo más sostenible. Tradicionalmente, la elaboración de mezclas de concreto ha dependido en gran medida de la extracción y procesamiento de recursos naturales, principalmente agregados finos y gruesos, como la arena y la grava. Sin embargo, el incremento en la demanda de estos recursos ha llevado a una explotación intensiva que amenaza su disponibilidad futura y afecta gravemente a los ecosistemas circundantes (Osorio Saraz, Varón Aristizabal, & Herrera Mejía, 2007). Por ende, la investigación y desarrollo de alternativas viables se ha consolidado como un área de enfoque primordial en el campo de la ingeniería civil y de materiales.

La búsqueda de nuevos materiales que puedan desempeñar funciones equivalentes o superiores a los agregados tradicionales en las mezclas de concreto es una tarea compleja, y requiere una comprensión profunda de las propiedades mecánicas, térmicas y químicas de los materiales propuestos. S.K., Singh, & Chourasia (2020) destacan que la implementación de nuevas tácticas y tecnologías no solo busca preservar los recursos naturales, sino también minimizar el impacto ambiental derivado de la producción y disposición de materiales de construcción. Por otro lado, Valencia Villegas, González Mesa, & Arbeláez Pérez (2019) sugieren que, al limitar la explotación de recursos naturales, se pueden reducir significativamente los impactos ambientales asociados, tales como la pérdida de biodiversidad, erosión del suelo y contaminación del agua. Por

lo tanto, es esencial llevar a cabo investigaciones que proporcionen datos concretos sobre las características y aplicaciones de materiales alternativos.

Para abordar esta cuestión de manera efectiva en el contexto mundial, se propone realizar una exhaustiva recolección bibliográfica que recopile los principales hallazgos de estudios, investigaciones y casos prácticos relacionados con el uso de materiales alternativos en la producción de compuestos cementicios. Esta revisión permitirá identificar las tendencias actuales, evaluar el desempeño de los materiales propuestos en condiciones específicas de la región y proponer líneas de investigación futuras que respondan a las necesidades y desafíos locales. Con la información adecuada, los ingenieros y científicos de materiales podrán diseñar mezclas de concreto más sostenibles y resilientes, contribuyendo así al desarrollo integral de la región.

2. Marco teórico

El mundo de la construcción es vasto y complejo, y su existencia se ha basado históricamente en una amplia gama de materiales y técnicas que han evolucionado a lo largo del tiempo para satisfacer las cambiantes demandas y desafíos de la sociedad. A medida que los edificios y estructuras se han vuelto más grandes y complejos, la necesidad de materiales más duraderos, versátiles y resistentes se ha intensificado haciendo necesaria una mayor fuerza de trabajo disponible para la investigación y la innovación. A continuación, se presenta el marco teórico, compuesto por los principales antecedentes, términos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.

2.1 Antecedentes

2.1.1 Historia del uso de materiales alternativos en compuestos cementicios

En sus inicios, los materiales alternativos, como las cenizas volantes y la escoria de alto horno, se encontraban en el núcleo de varias prácticas de construcción en culturas antiguas, contribuyendo a la mejora de la resistencia y durabilidad de las estructuras. La evidencia histórica sugiere que estos materiales eran combinados con sustancias como la cal para fortalecer los morteros, un hecho destacado por Malhotra (1993), quien documenta la utilización de cenizas volantes durante la época romana para estos fines.

El siglo XX marcó un periodo significativo en el auge de los materiales alternativos, específicamente después de la Segunda Guerra Mundial. En este tiempo, la devastación provocada por la guerra impulsó una necesidad imperiosa de reconstrucción, lo que llevó a la búsqueda de materiales más accesibles y sostenibles. Scrivener et al. (2004) han destacado en su trabajo el desarrollo de técnicas para la incorporación de escoria de alto horno en el cemento Portland, una innovación que presentó soluciones no solo económicas, sino también con mejoras en las propiedades mecánicas. Esta técnica, surgida durante los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, ejemplifica la síntesis de la ingeniería y la economía en la búsqueda de soluciones prácticas.

Posteriormente, para la década de 1960, el avance en las investigaciones fruto de la reconstrucción posguerra, llevó a la incorporación de nuevos materiales como residuos de vidrio en productos de construcción, aprovechando su disponibilidad y propiedades únicas. El enfoque se amplió hacia la utilización de residuos industriales y el desarrollo de concretos con fibras de

polímeros y compuestos, aprovechando materiales reciclados, esto aunado al crecimiento industrial de los países victoriosos tras la guerra, y la necesidad de los perdedores de incluirse rápidamente en el mercado y la economía global (Granados et al, 2022).

Para los años 90, los esfuerzos continuaron con un impulso hacia la sostenibilidad, con gobiernos y organizaciones que implementaron normativas para promover prácticas de construcción más ecológicas. De este modo, la creciente conciencia ambiental llevó a una mayor integración de los análisis de ciclo de vida y el diseño sostenible en la industria de la construcción (Cabrera et al, 2020).

Partiendo de lo anterior, se tiene que estos periodos destacaron por la transformación en la utilización de materiales alternativos a través de innovaciones tecnológicas, adaptación económica y una mayor sensibilidad hacia la sostenibilidad, la industria de la construcción abrazó y desarrolló materiales y técnicas que no solo respondieron a las necesidades inmediatas de la época, sino que también sentaron las bases para una construcción más responsable y eficiente en el futuro (Criado & Pacheco, 2022).

Más recientemente, la tendencia hacia la construcción sostenible ha fortalecido aún más la importancia de los materiales alternativos en compuestos cementicios. La creciente conciencia sobre el cambio climático y la necesidad de reducir la huella de carbono ha catalizado una investigación y aplicación más extensiva de estos materiales. Mehta (2002), un defensor prominente de la sostenibilidad en la construcción ha enfatizado el papel de los materiales alternativos, como cenizas volantes y residuos de vidrio, en la reducción del impacto ambiental. La adopción de estos materiales en la industria de la construcción refleja una transición hacia prácticas más ecológicas, ofreciendo soluciones para los desafíos contemporáneos, sin comprometer las necesidades estructurales y económicas. La continua evolución y

experimentación con materiales alternativos en la construcción refleja un compromiso con la innovación y la sostenibilidad, posicionando estos compuestos como fundamentales en la arquitectura y la ingeniería del futuro (Mehta, 2002).

La adopción de estos materiales en la industria de la construcción refleja una transición hacia prácticas más ecológicas, ofreciendo soluciones para los desafíos contemporáneos, sin comprometer las necesidades estructurales y económicas. La continua evolución y experimentación con materiales alternativos en la construcción refleja un compromiso con la innovación y la sostenibilidad, posicionando estos compuestos como fundamentales en la arquitectura y la ingeniería del futuro.

2.1.2 Estudios previos sobre la eficacia de materiales alternativos como agregados

Los antecedentes del presente estudio giran en torno a la exploración y comprensión de los agregados cementicios, particularmente enfocados en el uso de materiales reciclados, agregados sustentables y técnicas alternativas para mejorar la eficiencia y sostenibilidad en la construcción.

En primer lugar, se tiene el estudio de Juela, Bermeo, & Alvarez (2020) el cual se enfocó en la sustitución de diferentes componentes en la mezcla de concreto, comprendiendo que, el concreto es una combinación de cemento y diferentes agregados que permiten darle su consistencia especial y aspectos como dureza, resistencia, eficiencia, facilidad de mezcla, resistencia al agua, corrosión, tiempo de secado y demás (Juela et al, 2020); sin embargo, con el proceso convencional, los impactos ambientales son muy negativos, y por eso esta es un área de gran interés en la ingeniería civil, porque busca alternativas en esos agregados cementicios para que el producto sea adecuado, con las características requeridas pero sin tal impacto ambiental.

En este sentido, los autores explican que la inclusión de ceniza de bagazo de caña, arcilla caolín, yeso deshidratado y residuos de concreto reciclado son algunas alternativas que fueron evaluadas a través de ensayos de laboratorio cuidadosamente diseñados. La elección de estos materiales apuntaba a encontrar alternativas más sostenibles y rentables sin comprometer las propiedades esenciales del concreto. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión y resistividad eléctrica, dos parámetros críticos en la calidad del concreto. Los resultados demostraron que ciertos niveles de sustitución no solo mantuvieron estas propiedades, sino que las mejoraron en algunos casos, lo que sugiere aplicaciones prometedoras en la industria de la construcción y potencialmente una reducción en el impacto ambiental del material (Juela et al., 2020).

Por otro lado, la investigación realizada por Xargay et al (2019) se centró en el uso de materiales agregados reciclados en compuestos cementicios, un tema vital en la búsqueda de prácticas de construcción más sostenibles. A través de ensayos experimentales, examinaron cómo diferentes tipos de materiales reciclados fueron utilizados como agregados al concreto y se buscó determinar cómo estos afectan las propiedades físicas y mecánicas del cemento. Si bien, se observaron algunos deterioros en las características del material, lo más relevante fue que las propiedades resultantes todavía superaron los valores mínimos recomendados para su uso en aplicaciones estructurales. Esto indica que la utilización de estos materiales reciclados es viable y puede representar una importante contribución hacia una construcción más ecológica y eficiente en términos de recursos. La investigación no solo refuerza la necesidad de explorar alternativas sostenibles en la construcción, sino que también proporciona una base sólida y empírica para futuras investigaciones en este campo (Xargay et al., 2019).

En el estudio de Cevallos et al, (2018) se exploraron los compuestos FRCM (fabric-reinforced cementitious matrix, por sus siglas en inglés) producidos con fibras naturales como una alternativa potencial a los sistemas compuestos producidos con fibras sintéticas o minerales para este producto. La eficacia de los compuestos FRCM depende de su habilidad para unir y transmitir tensiones internas entre sus componentes. La investigación se enfocó en diseñar un sistema de este material reforzado con telas de sisal para lograr niveles satisfactorios de adherencia y resistencia.

El estudio explica que, para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, fue necesario el diseño y fabricaron telas de sisal con características geométricas propicias para la penetrabilidad. Se verificó el comportamiento mecánico del sistema FRCM mediante pruebas de SLS (Single Lap Shear, por sus siglas en inglés) y pull-off, comparándolo con materiales compuestos con telas de sisal no diseñadas. Los resultados evidencian el potencial de estos materiales naturales en la ingeniería civil como una alternativa de agregados muy viable, aunque también plantean desafíos en cuanto a su implementación y eficacia, tales como la evaluación y el desarrollo del producto final (Cevallos et al, 2018).

Así mismo, Benitez Soxo (2022) es otro referente, este se enfoca en como existen diferentes materiales alternativos para la industria de la ingeniería civil como reemplazo de los agregados convencionales (fino y grueso), para la producción de concreto, esto, con el objetivo de tener un impacto en la mejora de propiedades y características del producto final. El estudio se centra en los compuestos de refuerzo denominados NFRCM (compuestos de matriz cementicia reforzados con fibras naturales), el cual brinda mayor estabilidad y dureza, evaluando diferentes tipos de compuestos con matriz cementicia, fibras vegetales, procesos de elaboración y técnicas de colocación.

La investigación revela que el comportamiento de estos compuestos depende en gran medida de la interacción en las interfaces matriz-refuerzo textil y compuesto NFRCM-elemento de concreto armado. La revisión bibliográfica demuestra que los compuestos de refuerzo aportan mejores características frente a esfuerzos externos y poseen la sostenibilidad necesaria para garantizar un bajo impacto ambiental. Se concluye que los avances en estos compuestos son prometedores y pueden tener aplicaciones significativas en la industria de la construcción (Benítez Soxo, 2022).

Finalmente, la investigación realizada por Pastrana et al (2019) apunta a desarrollar materiales cementicios alternativos y ecoeficientes para sustituir los agregados convencionales del concreto, especialmente para aplicaciones en elementos constructivos de bajo costo. La investigación se enfocó en lograr propiedades similares al cemento Portland mediante la incorporación de adiciones minerales, aditivos naturales como jugo de hojas de fique, de banano, de papa parda y papa cidra, y la activación alcalina de residuos de mampostería.

El estudio también incluyó la utilización de agregados finos y gruesos, como gravas y arenas, así como residuos de demolición. Las aplicaciones desarrolladas incluyeron elementos de mampostería (bloques y ladrillos), placas y elementos para cubiertas (tejas). La inclusión de aditivos como la cal hidratada y otros desechos industriales o agroindustriales permitió mejorar las propiedades reológicas y reducir el agrietamiento, lo que demuestra la viabilidad de estos materiales en la reducción del impacto ambiental y costos asociados a la producción de cemento Portland (Pastrana et al, 2019).

2.2 Concreto

El concreto, según su definición tradicional, es una composición homogénea resultante de la mezcla de un material aglutinante, específicamente el cemento portland hidráulico, con materiales de relleno denominados agregados, agua y diversos aditivos. Una vez sometida a un proceso de curado, esta mezcla se transforma en un sólido compacto y resistente (Guerrero Vargas & Chaves García, 2013). Sin embargo, la complejidad del concreto reside en su diversidad, pues sus características y propiedades pueden variar ampliamente dependiendo de los materiales utilizados, su origen y las proporciones en las que se combinan (Terreros Rojas & Carvajal Corredor, 2016).

En la actualidad, con la emergencia de tecnologías avanzadas y la investigación continua, se han desarrollado diversos tipos de concretos adaptados a necesidades específicas. Taylor et al. (1997) mencionan el surgimiento del concreto autocompactante y el concreto de alta resistencia como ejemplos de adaptaciones dirigidas a satisfacer demandas específicas en la construcción.

Históricamente, las construcciones a base de concreto han demostrado ser más duraderas y versátiles en comparación con las construcciones de madera, mampostería o acero, consolidando su posición como el material constructivo predilecto a nivel mundial resistente (Guerrero Vargas & Chaves García, 2013). Esta preferencia no solo se debe a su resistencia, sino también a la flexibilidad que ofrece en términos de diseño y aplicaciones (Mehta, 2002).

No obstante, el desempeño y calidad del concreto no se da de manera automática. Existen múltiples factores que pueden influir en sus propiedades y, por ende, en su comportamiento estructural. Hernandez Cano (2013) identifica algunos de estos factores como la proporción entre los agregados gruesos, la arena y el cemento; la relación agua-cemento, que puede influir en la

trabajabilidad y resistencia del concreto; la calidad y tipo de agregado utilizado; el método de mezcla y colocación; y el tiempo y condiciones de curado. A estos, Li et al. (2004) añaden la importancia de los aditivos y suplementos, que pueden ser utilizados para mejorar características específicas del concreto, como su resistencia al agua, su capacidad de autoreparación, y demás parámetros relacionados con la eficiencia del producto final.

De esta manera, el concreto puede entenderse como un material con una rica historia y una versatilidad que lo ha mantenido relevante en el mundo de la construcción. Sin embargo, su aplicación óptima requiere un profundo entendimiento de sus componentes y las interacciones entre ellos.

2.2.1 Trabajabilidad del concreto

La trabajabilidad del concreto es un parámetro crítico que tiene importantes implicaciones en la calidad y durabilidad de las estructuras de concreto. Se define como la facilidad con la que una mezcla de concreto puede ser fabricada, transportada, vertida, y compactada sin segregación (Neville, 2011). Esta característica del concreto está directamente relacionada con la proporción y tipo de los componentes de la mezcla, especialmente la relación agua-cemento y los aditivos utilizados (Mehta, 2002).

Una adecuada trabajabilidad garantiza que el concreto pueda ser vertido y compactado de manera eficiente, llenando todos los espacios vacíos y garantizando la eliminación de burbujas de aire, que podrían afectar la resistencia y durabilidad del material (Terreros Rojas & Carvajal Corredor, 2016). Además, un concreto con la trabajabilidad adecuada reduce el esfuerzo de compactación, lo que minimiza el riesgo de errores durante la colocación (Neville, 2011).

A medida que la industria de la construcción avanza, se han desarrollado aditivos y modificadores para mejorar la trabajabilidad del concreto. Estos aditivos permiten mantener una baja relación agua-cemento mientras se logra una alta trabajabilidad, lo que resulta en un concreto de mayor resistencia y durabilidad (Terreros Rojas & Carvajal Corredor, 2016).

2.2.2 Durabilidad

La forma en que el concreto presenta resistencia a la acción del medio ambiente recibe el nombre de durabilidad. Terreros Rojas y Carvajal Corredor (2016) afirman: “La durabilidad es la habilidad para actuar contra los ataques químicos, abrasión, entre otras, de tal manera que sus propiedades iniciales se conserven durante toda su vida útil” (p.12). En este sentido, la durabilidad del concreto es una de las propiedades más esenciales y, a menudo, pasada por alto de este material de construcción. La habilidad del concreto para resistir diversos factores ambientales y mantener su integridad estructural y estética a lo largo del tiempo es vital para el éxito a largo plazo de cualquier estructura (Neville, 2011).

El concreto, a pesar de su aparente robustez, es susceptible a una variedad de procesos de degradación, que incluyen ataques químicos, congelamiento y descongelamiento, corrosión de la armadura y abrasión. Por ejemplo, la reacción álcali-árido, donde algunos agregados reaccionan con los álcalis del cemento, puede llevar a la formación de geles expansivos, causando fisuración y pérdida de resistencia en el concreto (Mehta & Monteiro, 2014).

La exposición al agua de mar, rica en iones cloruro, puede acelerar la corrosión de las barras de refuerzo, reduciendo significativamente la vida útil de las estructuras de concreto reforzado en ambientes marinos (Alexander & Bertron, 2012). Además, en climas donde las

temperaturas fluctúan alrededor del punto de congelamiento, los ciclos repetidos de congelamiento y descongelamiento pueden causar daños en la matriz de concreto, llevando a la descamación y fisuración (ACI Committee, 2019).

Para abordar estos desafíos, los ingenieros y científicos han trabajado en el desarrollo de concretos de alta durabilidad utilizando diversas estrategias, que incluyen el uso de aditivos, la selección de agregados y la optimización de la relación agua-cemento (Bentz et al., 2017). La investigación en este campo continúa, con un énfasis particular en la comprensión de los mecanismos fundamentales de deterioro y en la identificación de soluciones innovadoras para prolongar la vida útil del concreto en condiciones adversas (Taylor et al., 2020).

2.2.3 Resistencia

La resistencia del concreto es, sin duda, una de las propiedades más fundamentales que determina su aptitud para una variedad de aplicaciones estructurales y estéticas. Esta resistencia puede ser vista como la capacidad del concreto para soportar cargas sin experimentar una deformación no deseada o fracaso estructural (Neville, 2011).

La resistencia a la compresión es la más comúnmente evaluada, dada su relevancia en la mayoría de las aplicaciones estructurales. Es un indicador del comportamiento del concreto bajo cargas que tienden a reducir su volumen (Mindess et al., 2003). Por otro lado, aunque el concreto es débil en resistencia a la tracción, es vital en aplicaciones donde se pueden producir fisuras, como en losas y muros (Oyen, 2019).

La resistencia a la flexión es crucial, especialmente en elementos sometidos a cargas flexionantes, como vigas y losas. Esta resistencia es un indicativo de cómo el concreto se

comportará bajo cargas que tienden a doblarlo, además, de acuerdo con Franco et al (2022) la resistencia al corte es esencial para estructuras que enfrentan fuerzas de cizallamiento, como es el caso de columnas y muros sometidos a cargas laterales, como el viento o un sismo.

De acuerdo con Borda et al (2022) la composición del concreto, la relación agua- cemento, el tipo y la cantidad de agregados y aditivos, y las condiciones de curado, son todos factores que influyen en su resistencia. En los últimos años, la investigación ha llevado a la creación de concretos de ultra alta resistencia, que pueden alcanzar resistencias a la compresión superiores a los 150 MPa, gracias a la incorporación de fibras y la optimización de la mezcla (Silva, 2020).

2.2.4 Agregados

Los agregados son esenciales en la fabricación de concreto y mortero, y actúan como un esqueleto o soporte dentro de la mezcla. Aunque son inertes y no intervienen en el proceso de endurecimiento del cemento, su rol es crucial para brindar volumen, mejorar la resistencia y economizar la mezcla (Neville, 2011). De este modo, la calidad y el tipo de agregado utilizado influyen significativamente las propiedades finales del concreto. Estos materiales, dependiendo de su origen, pueden ser naturales, como los obtenidos de ríos, o artificiales, producidos a través de procesos industriales (Guerrero Vargas & Chaves García, 2013).

El objetivo de cualquier agregado es garantizar una fuerte adherencia con la pasta de cemento endurecida. El contenido típico de agregados en concreto oscila entre el 65% y el 75% del volumen total (Silva & Castro, 2022), lo que resalta su importancia en la formulación del material. Esta proporción es vital no solo para economizar la mezcla, sino también para lograr la densidad, resistencia y durabilidad deseadas.

Ahora, en función de la granulometría, los agregados se dividen en finos y gruesos. Los agregados finos son aquellos cuyo 100% del material es retenido por el tamiz N°200 (74 μ). Por otro lado, los agregados gruesos son aquellos que son retenidos completamente en el tamiz N°4 (4.75 mm) (NTC174, 2000). Mientras que los agregados finos influyen en la trabajabilidad y asentamiento de la pasta, los agregados gruesos son determinantes en la resistencia del concreto, en gran parte debido a su relación de adherencia (Silva & Castro, 2022). Es esencial equilibrar estos componentes adecuadamente, ya que la proporción y calidad de ambos tipos de agregados influyen en las características finales del concreto (Mindess et al., 2003).

2.2.5 Agregados reciclados

La utilización de agregados reciclados en la industria de la construcción representa una solución sustentable para gestionar los desechos provenientes de demoliciones y reformas, y al mismo tiempo, disminuir la explotación de recursos naturales. Estos agregados se derivan principalmente de la destrucción de infraestructuras antiguas, siendo su calidad y propiedades físico-mecánicas altamente dependientes del tipo de estructura de origen y la calidad del concreto originalmente empleado (Silva, 2020).

Los agregados reciclados se clasifican con base en su nivel de pureza. Los denominados "agregados reciclados limpios" contienen al menos un 95% de un único tipo de material, con solo un 5% de impurezas. Por otro lado, los "agregados reciclados sucios" tienen proporciones de impurezas que superan el 5%, lo que puede afectar su desempeño en nuevas mezclas de concreto (Neville, 2011).

Uno de los factores más cruciales en la calidad de estos agregados es la naturaleza de la roca madre, que es el material original a partir del cual se produjo el concreto. Además, el proceso de trituración y clasificación a través del cual se obtienen estos agregados, así como el tipo y calidad del hormigón original, son determinantes en su desempeño posterior (Zega & Di Malo, 2007).

Es esencial mencionar que la adopción de agregados reciclados en la producción de concreto nuevo enfrenta desafíos en términos de resistencia y durabilidad. Sin embargo, con la tecnología y técnicas adecuadas de procesamiento, estos agregados pueden ser empleados con éxito en diversas aplicaciones de construcción, promoviendo la sostenibilidad y la economía circular en el sector (Neville, 2011).

3. Metodología

Este documento plantea cumplir tres objetivos específicos en búsqueda de alcanzar un objetivo general que dé respuesta al planteamiento del problema propuesto. En ese sentido, a continuación, se presentan esos objetivos que serán desarrollados de forma secuencial bajo parámetros y fases específicas que se explican más adelante.

3.1 Objetivo general

Elaborar un análisis de tipo documental sobre el comportamiento de las propiedades mecánicas y de durabilidad de compuestos cementicios ante el uso de materiales alternativos como reemplazo de agregados finos o gruesos.

3.2 Objetivos específicos

Identificar los materiales alternativos utilizados como reemplazo de agregados en la fabricación de compuestos cementicios.

Destacar las variaciones en las propiedades mecánicas de compuestos cementicios con reemplazos de agregado fino y grueso, frente a agregados de origen convencional.

Indicar los efectos del uso de materiales alternativos para agregados finos y gruesos en la fabricación de compuestos cementicios sobre su durabilidad.

3.3 Metodología de Investigación

En búsqueda de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se llevó a cabo una investigación netamente teórica con enfoque cualitativo, dado que no se implementaron acciones físicas o experimentales, sino una revisión de teorías y literatura científica sobre los temas de estudio. De acuerdo con Vasilachis (2020) con el enfoque cualitativo de investigación es posible “...estudiar fenómenos que pueden ser sociales, culturales, económicos, productivos o ambientales, desde sus rasgos no cuantificables” (p. 82). A través de este enfoque es posible

identificar el impacto que tiene el fenómeno estudiado, así como su incidencia y trasfondo, considerando, por ejemplo, desde la literatura, que materiales alternativos pueden ser utilizados como reemplazo de agregados en compuestos cementicios, sus variaciones, propiedades y demás aspectos relevantes.

3.3.1 Tipos de Investigación

Ahora bien, ese enfoque de investigación se posibilita gracias a la utilización de dos técnicas específicas que permiten cumplir los objetivos, las cuales son:

3.3.1.1 Tipo Descriptivo. Este tipo de investigación lo definen Guevara et al (2020), como el que permite “...caracterizar un fenómeno y comprender el porqué de su ocurrencia, identificando generalidades, descripción global y parámetros adicionales” (p. 168), en este caso, buscando describir que es el agregado y que rol cumple en la producción de compuestos cementicios, que rol tiene y cuál es la importancia de estos materiales en la construcción en general.

A partir de esa caracterización, se buscan alternativas que permitan conocer otros materiales que satisfagan esta problemática, pero de forma integral, con variaciones, resultados, compuestos, relaciones y demás, y ahí es donde se aplica el segundo tipo de investigación cualitativa que se describe a continuación.

3.3.1.2 Revisión Documental. Este segundo tipo de investigación se estudia como aquel que permite a los investigadores conocer múltiples posturas y hallazgos de un tema específico frente a una problemática o temática seleccionada, basada en estudios científicos y académicos de

otros autores previos, que, a través de sus principales hallazgos, permiten corroborar o descartar una hipótesis. Al aplicar este tipo de investigación por revisión documental se consiguió determinar otros estudios que analizan diferentes materiales alternativos como reemplazo de agregados en la fabricación de compuestos cementicios. Con base en los hallazgos se permite dar respuesta a los objetivos específicos del proyecto (Casasempere, 2020). Con base en los hallazgos también, se permite dar respuesta a los objetivos específicos del proyecto.

3.3.2 Diseño de la Investigación

Este proyecto se basa en la propuesta metodológica de cumplimiento a tres objetivos específicos, por lo cual, habrá cuatro fases secuenciales en el diseño de la investigación. En las primeras tres, cada una busca responder un objetivo específico de forma ordenada (primero el número 1, luego 2 y finalmente el 3). A partir de ahí, la cuarta fase de investigación busca sintetizar y analizar los hallazgos de las tres fases anteriores, discutiendo la investigación y permitiendo dar respuesta objetiva a los objetivos específicos.

3.3.3 Técnicas de Recolección de Información

Para la investigación se utilizaron únicamente fuentes que sean confiables y den garantías de lo que publican, por lo cual, es necesario resaltar el uso de sitios web oficiales y gubernamentales para efectos complementarios, así como páginas certificadas, para ello, se utilizan aquellas especializadas en ingeniería y estudio de materiales de construcción, sitios Web de empresas confiables con trayectoria en el mercado y sitios similares.

Para la revisión documental, se utilizaron bases de datos académicas como Google Scholar, ScienceDirect, EBSCO host, Scielo, Redalyc y todas las relevantes. Se empleó el uso de investigación en repositorios institucionales y bases de datos públicas. Respecto a los criterios de búsqueda, se utilizaron palabras clave en inglés como: "Materials", "Fine Aggregates", "Coarse Aggregates", "Alternatives", "Recycled", "Replacement", "Geopolymers" y "Cementitious Composites". En la tabla 1 se señalan las 10 palabras claves más encontradas en el resumen de las publicaciones consultadas, las cuales se obtuvieron por medio del uso de la herramienta Scopus.

Los criterios de priorización se dieron por temporalidad, donde aquellos artículos e investigaciones más recientes fueron más valorados frente a fuentes más antiguas. De igual modo, toda literatura utilizada es académica, científica o certificada y no hay una distinción sobre la fecha de publicación, solo priorización para estudios más recientes.

Tabla 1.

Palabras clave más frecuentes.

Palabras	Ocurrencias
Concrete Aggregates	155
Compressive Strength	151
Concrete	144
Aggregates	113
Coarse Aggregates	73
Recycling	71
Fly Ash	67
Fine Aggregates	66
Cements	49

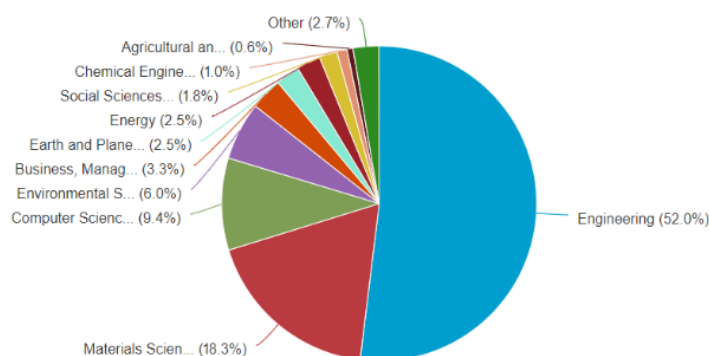
Nota: Adaptado de: Scopus - Analizar resultados de búsqueda Registrado. (n.d.). “Analizador de Scopus”.

3.3.4 Análisis bibliográfico

Se utiliza la herramienta Scopus, con el fin de obtener un estudio bibliográfico detallado de la investigación que se lleva a cabo, teniendo en cuenta puntos relevantes como autores, palabras clave y producción de documentos por países. Como se observa en la figura 1, hay diferentes áreas que se ven interesadas en el estudio de estos temas, aun así, las más relevantes corresponden a ingeniería (52.0%), ciencia de los materiales (18.3%) y ciencias medioambientales (9.4%).

Figura 1.

Área temática de los artículos.



Nota: Adaptado de: Scopus - Analizar resultados de búsqueda |Registrado. (n.d.). *Analizador de Scopus.*

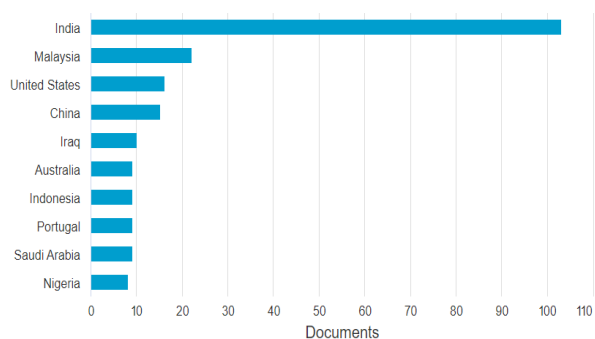
Ahora bien, también es importante, debido al contexto mundial de la investigación, destacar la producción de documentos por países, donde se puede notar el alto nivel de relevancia

en este tema para países como India, Malasia, Estados Unidos y China. Lo anterior se destaca en la figura 2 para una mayor comprensión visual.

Por otra parte, en la figura 3 se ilustra cómo el análisis obtenido por medio de la herramienta Scopus permite exponer un aumento en la producción de investigaciones alrededor de este tema, destacando 2019 – 2020, años donde la producción de investigaciones a nivel documental se intensificó notablemente debido al tiempo de confinamiento mundial como consecuencia de la pandemia ocasionada por el COVID-19. Lo anterior ayuda a verificar una tendencia creciente respecto al avance de estudios con fines ecológicos en las épocas modernas tal como se observó en la indagación del marco teórico para el presente documento.

Figura 2.

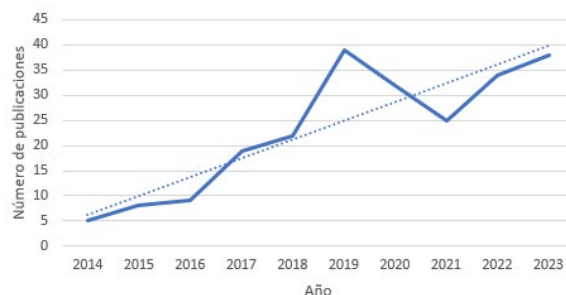
Producción de documentos por países.



Nota. Tomado de: *Scopus - Analizar resultados de búsqueda | Registrado.* (n.d.). Analizador de Scopus.

Figura 3.

Publicaciones por año.



Nota. Tomado de: *Scopus - Analizar resultados de búsqueda | Registrado.* (n.d.). Analizador de Scopus.

3.4 Desarrollo de Primer Objetivo Específico

En esta primera sección, se busca dar cumplimiento al objetivo específico de identificar los materiales alternativos utilizados como reemplazo de agregados en la fabricación de compuestos cementicios.

En ese sentido, dentro de los materiales alternativos que se pueden utilizar como reemplazo de agregados resaltan la escoria de alto horno, la ceniza volante, el vidrio triturado, polímeros reciclados, RCD (residuos de construcción y demolición), neumáticos reciclados, cáscaras de arroz y de coco, y nanomateriales, cuyas propiedades podrían proveer las características necesarias a la mezcla, sin afectar la estructura del cemento pero sí promoviendo un mejor impacto ambiental, como explica Antunes, que se basen en tecnologías alternativas como el clinker modificado, para reducir las emisiones de carbono en la industria del cemento, y permitir una producción sostenible sin afectar las características del cemento como tal (Antunes et al, 2021).

3.4.1. Agregados industriales

El primer agregado convencional utilizado para la producción de cemento, son aquellos de origen de materiales industriales, por ejemplo, la escoria de alto horno, que, de acuerdo con Malhotra (1993), se trata de un agregado grueso muy utilizado en la industria, siendo un subproducto de la producción de hierro. Su uso fue pensando en inicios para reducir el costo productivo del cemento, al mismo tiempo que mejora las propiedades del concreto, como la resistencia y durabilidad, por lo que es importante utilizarlos (Malhotra, 1993).

Otro agregado convencional son las cenizas volantes, estas juegan un rol importante en todo el proceso, son un tipo de agregado fino que surge de la combustión de carbón en centrales eléctricas. Sin embargo, ha sido utilizado como un reemplazo parcial de agregados finos del concreto como la arena (Cevallos et al, 2018), por lo cual no es tan utilizado y es considerado solo un material alternativo, se resalta que el uso de este agregado mejora la trabajabilidad y reduce la permeabilidad del concreto, por lo cual es fundamental su desarrollo.

Se menciona también el silicato de calcio, el cual, según Granados, se utiliza como un agregado para dar características especiales al cemento como dureza, resistencia y facilidad de mezclado, al tiempo que su origen es de bajo costo, y puede tener un impacto considerable en la producción de cemento (Granados et al, 2022).

3.4.2 Compuestos avanzados

De compuestos avanzados, se destacan las fibras de carbono, conocidas por su alta resistencia y rigidez, están siendo exploradas como reemplazo de agregados en concreto de alto

rendimiento. Pueden mejorar significativamente la resistencia a la flexión y la ductilidad del concreto (Banibayat & Patnaik, 2013). Los nanomateriales, como los nanotubos de carbono y las nanopartículas de sílice, están siendo investigados por su potencial para mejorar las propiedades mecánicas y durabilidad del concreto (Mantilla et al, 2019). Su incorporación en pequeñas cantidades puede tener un impacto significativo en la resistencia y la vida útil del concreto.

De cualquier modo, las alternativas de agregados en compuestos cementicios son de gran importancia en la industria de la construcción ya que pueden influir significativamente en las propiedades y el desempeño de este, principalmente por las características del cemento (Mantilla et al, 2019). Existe una amplia gama de materiales que pueden utilizarse como alternativas de agregados en compuestos cementicios como por ejemplo cenizas de alto horno, caucho triturado, vidrio, cáscaras de arroz y plástico.

La cuestión radica en que, en la búsqueda de alternativas de agregados sostenibles se ha vuelto una prioridad en la industria de la construcción debido a la creciente conciencia ambiental, pues el uso de agregados reciclados, como el concreto reciclado o materiales naturales abundantes y de bajo impacto ambiental, puede contribuir a la reducción de la huella ecológica de los proyectos de construcción.

3.4.3 Alternativas de agregados en la fabricación del cemento

3.4.3.1 Materiales reciclados. El vidrio triturado es visto como una alternativa prometedora a los agregados finos convencionales en la fabricación de cemento, tratándose de un reciclado de desechos de vidrio. Aunque este producto presenta desafíos en términos de reacción álcali-sílice, las investigaciones han demostrado que puede ser utilizado con éxito bajo condiciones

controladas (Alva & Quesquen, 2020). El vidrio triturado no puede reemplazar de lleno los agregados finos convencionales como la arena, ya que no cuenta con las propiedades que esta otorga, sin embargo, si puede reducir su utilización y permitir bajar el impacto ambiental del producto final.

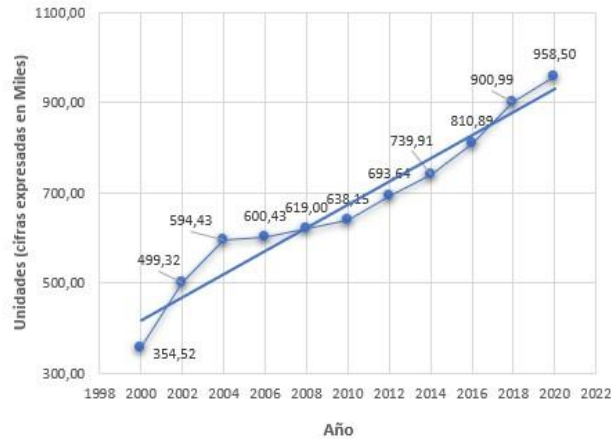
El uso de estos materiales reciclados puede mejorar la resistencia a la tensión y la durabilidad del concreto. Por otro lado, los residuos de construcción y demolición están siendo reciclados y utilizados como agregados en nuevos concreto, esto no solo reduce la cantidad de desechos en los vertederos, sino que también ofrece una solución sostenible para la industria de la construcción.

Los neumáticos reciclados triturados han sido utilizados como materiales de reemplazo para los agregados gruesos en concreto, siendo una alternativa prometedora ya que, aunque presentan desafíos en términos de adherencia y resistencia, ofrecen una solución innovadora para el problema de desecho de neumáticos. Esta problemática se demuestra en la figura 4, la cual destaca la preocupante tendencia creciente de neumáticos desechados en Colombia anualmente, considerando que, cada año son más vehículos y más neumáticos que no son reutilizados para otras labores.

Como se evidencia, cada año son más los desechos de caucho hasta el último corte del DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística) en 2020, con un total de 958.500 neumáticos en todo el año, esto es una cifra preocupante, y adoptar esta producto como un material alternativo a los agregados gruesos del concreto, permite dar dos respuestas a la crisis, una a la problemática de contaminación del medio ambiente por exceso de desechos de neumáticos, y otra para mejorar las propiedades, costo productivo y características del concreto; sin embargo, el reto está en contrarrestar la adherencia y resistencia del producto.

Figura 4.

Tendencia de neumáticos desechados en Colombia, periodo 2000-2020.



Nota. Adaptado con base en datos del DANE y (Revista Semana, 2021).

3.4.3.2 Materiales de la industria agrícola. Las cáscaras de arroz, especialmente tratadas y molidas, han sido exploradas como un reemplazo parcial de los agregados finos en concreto (Neville, 2011). Su uso contribuye a la sostenibilidad y ofrece una disposición útil para un subproducto agrícola comúnmente desechado. Por otro lado, según los mismos autores, las cáscaras de coco tratadas y trituradas están siendo exploradas como un reemplazo parcial del agregado grueso en concreto. Su uso puede mejorar la resistencia al impacto y ofrecer una solución sostenible para un subproducto agrícola comúnmente desechado.

3.4.4 Comparativa

A partir de los resultados anteriores, y con base en la información recolectada, se puede considerar como materiales alternativos principales a los agregados convencionales la escoria de alto horno, las cenizas volantes, vidrio triturado, las cáscaras de arroz y coco como alternativas a

los agregados finos convencionales utilizados en la fabricación del concreto, y cada uno otorgando un beneficio o características diferentes. Como alternativa a los agregados gruesos, se pueden utilizar materiales como los polímeros reciclados, los residuos de construcción, los neumáticos desechados, y las fibras de carbono, los cuales se detallan más adelante.

Cada uno de estos materiales difiere con los demás, y son alternativas que surgen del proceso de investigación y análisis de literatura científica. Para comprender el tema de una mejor manera, a continuación, se presenta la tabla 2, en la que se observa con mayor detalle las características físico-mecánicas más relevantes de cada uno de los materiales alternativos presentados como reemplazo de los agregados convencionales en la producción de concreto.

Tabla 2.

Resumen de beneficios y usos específicos de los materiales agregados alternativos

Materiales	Uso Específico	Beneficios	Características Físico-Mecánicas
Materiales Industriales			
Escoria de alto horno	Reemplazo parcial para agregados finos en concreto	Mejora resistencia y durabilidad, reduce demanda de agregados naturales	Densidad: 2.5-2.9 g/cm ³ . Mejora resistencia a la compresión, alta durabilidad, menor porosidad.
Cenizas volantes	Reemplazo parcial de cemento y agregados finos en concreto	Mejora trabajabilidad, reduce permeabilidad	Densidad: 2.1-3.0 g/cm ³ . Mejora resistencia a la compresión, mejora durabilidad.
Materiales Reciclados			
Vidrio triturado	Reemplazo para agregados finos en concreto	Uso exitoso bajo condiciones controladas	Densidad: 2.5 g/cm ³ . Resistencia a la compresión similar a agregados naturales, potencial reacción álcali-sílice.

Materiales	Uso Específico	Beneficios	Características Físico-Mecánicas
Polímeros reciclados	Reemplazo de agregados gruesos en concreto	Mejora resistencia a la tensión y durabilidad	Densidad: 0.9-1.5 g/cm ³ . Alta resistencia al desgaste y corrosión.
Residuos de construcción y demolición	Reemplazo de agregados gruesos en nuevos concretos	Reduce desechos en vertederos, solución sostenible	Densidad: 2.3-2.5 g/cm ³ . Resistencia a la compresión variable, mayor porosidad.
Neumáticos reciclados	Reemplazo para agregados gruesos en concreto	Solución innovadora para desecho de neumáticos	Densidad: 0.75-1.2 g/cm ³ . Menor resistencia a la compresión, desafío en adherencia.
Materiales Agrícolas			
Cáscaras de arroz	Reemplazo parcial de agregados finos en concreto	Contribuye a la sostenibilidad, disposición útil de subproducto desechado	Densidad: 1.2 g/cm ³ . Menor resistencia a la compresión, alta sostenibilidad.
Cáscaras de coco	Reemplazo parcial de agregados finos en concreto	Mejora resistencia al impacto, solución sostenible	Densidad: 1.2 g/cm ³ . Mejora resistencia al impacto.
Materiales Avanzados			
Fibras de carbono	Reemplazo de agregados gruesos en concreto de alto rendimiento	Mejora resistencia a la flexión y ductilidad	Densidad: 1.5-2.0 g/cm ³ . Alta resistencia a la flexión.

Nota. Con base en investigaciones de (Banibayat & Patnaik, 2013), (Zapata y otros, 2014), (Shayan & Xu, 2004), (Dhir y otros, 1997), (Saikia & Brito, 2014), (Sienkiewicz et al., 2012), (Chandrasekhar et al., 2003).

3.5 Desarrollo del Segundo Objetivo Específico

Como segundo objetivo, se busca destacar las variaciones en las propiedades mecánicas de compuestos cementicios con reemplazos de agregado fino y grueso, frente a agregados de origen

convencional, para ello, se deben identificar esas alternativas respecto a lo convencional, creando así, los siguientes incisos.

3.5.1. Escoria de alto horno

Uno de los materiales históricamente utilizado como sustituto en las mezclas de concreto es la escoria de alto horno, cuya fabricación proviene de la producción de hierro fundido (Siddique, 2008). A raíz de esto, numerosos investigadores han llevado a cabo estudios sobre el impacto del uso de este material en las propiedades del concreto. N. Rojas y otros, en su investigación, señalan los factores que influyen en los efectos beneficiosos del uso de este material, como la calidad de la escoria, el diseño adecuado de la mezcla, el tiempo y el tipo de curado. En sus ensayos, utilizaron valores de reemplazo de hasta el 80%, observando un aumento leve en la resistencia a la compresión en el rango del 20% al 60% a los 28 y 90 días, mientras que para valores superiores al 60%, la resistencia tiende a disminuir (Rojas et al., 2023).

Del mismo modo, Berndt (2009) resaltó en su estudio que el reemplazo del 50% es el más beneficioso, ya que para esta mezcla la resistencia corresponde a 35.9, 45.7 y 49.8 MPa a los 7, 28 y 84 días, respectivamente, mostrando un aumento con el tiempo. Para la mezcla con un reemplazo del 70%, la resistencia a la compresión disminuye. Al medir el módulo de elasticidad, obtuvieron un valor de 47.4 GPa para el reemplazo del 50%, equivalente al de la mezcla de referencia cuyo valor fue de 47.2 GPa. Siguiendo la misma tendencia de la resistencia, con un reemplazo del 70%, su valor disminuye a 45.6 GPa (Berndt, 2009).

Por otro lado, G.J. Osborne resumen los resultados de las pruebas de rendimiento y durabilidad del concreto con adición de escoria de alto horno, destacando nuevamente el 50%

como el óptimo para obtener una mezcla cuya utilidad sea comparable a la del concreto convencional. También advierten que los niveles altos de reemplazo pueden resultar útiles en casos donde el concreto requiera resistencia química a sulfatos, cloruros y/o agua de mar (Osborne, 1999).

Una vez más, en otros estudios realizados, donde se utilizaron reemplazos de escoria de alto horno que oscilaron entre el 25% y el 55%, se evidencia que la resistencia a la compresión de las muestras fue similar a la del concreto fabricado con agregados convencionales a los 28 días de curado. No obstante, a los 56 días se observó un cambio significativo a partir de un reemplazo del 55%. Asimismo, la resistencia a la corrosión se ve beneficiada de manera notable por un contenido de escoria superior al 40% (Yeau & Kim, 2005). Con base en lo anterior se podría decir entonces que el rango promedio para el uso de escoria de alto horno con propiedades de mezcla óptimas estaría entre 40% a 70%.

3.5.2 Cenizas volantes

Al igual que la escoria de alto horno, la ceniza volante se cuenta entre los materiales más antiguamente utilizados para reemplazar componentes en la elaboración de mezclas de concreto. A raíz de esto, varios investigadores han conducido estudios sobre este tema. Entre la información más contemporánea disponible en bases de datos, se destaca la investigación de Canul et al (2016), que examina el impacto de la ceniza volante en las propiedades mecánicas del concreto. Los hallazgos de este estudio indican que, al incrementar la proporción de material de reemplazo, la porosidad de la mezcla aumenta ligeramente. En consecuencia, se plantea que la utilización de

ceniza volante reduce la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto, dado que la porosidad generada incide directamente en estas dos propiedades.

En línea con lo anterior, O. Molina (2008) establece que el material de reemplazo debe emplearse en un máximo de 10%, ya que superar este porcentaje provoca una disminución notable en la resistencia del concreto (Molina, 2008). No obstante, en lo que respecta a la durabilidad, se observa una relación opuesta, ya que los reemplazos del material en un 50% o más mejoran significativamente la resistencia a la penetración de cloruros. En cuanto a la permeabilidad del concreto, se evalúa a períodos de curado de 40 y 91 días, resaltando que, en las primeras pruebas, los valores obtenidos con un alto contenido de reemplazo son comparables a los de la mezcla convencional. Sin embargo, en los ensayos finales, la permeabilidad disminuye notablemente con un reemplazo del 50% de ceniza. Además, el módulo de elasticidad disminuye con la presencia de ceniza en la mezcla hasta los 28 días, a partir de este momento, muestra un ligero aumento, según se detalla en la tabla 3.

Tabla 3.

Módulo de elasticidad en diferentes tiempos de curado (GPa).

% ceniza	7 días	28 días	91 días
0%	29.1	30.3	31.7
35%	22.8	25.4	34.1

Por su parte, tras examinar la influencia de las cenizas como reemplazo de agregado fino, concluye que la resistencia a la compresión, tracción, flexión y el módulo de elasticidad presentan valores superiores a los obtenidos en una mezcla convencional en todas las edades de curado (Siddique, 2003).

3.5.3 Vidrio triturado

Con el transcurso del tiempo, la fibra de vidrio ha adquirido un perfil prometedor como sustituto de los agregados convencionales, respaldado por diversas hipótesis y estudios que han evaluado sus propiedades y ventajas.

En este contexto, Alayo & Quezada (2022) inician su investigación con la premisa de que la incorporación de vidrio aumenta tanto la resistencia a la compresión como a la flexión. En el desarrollo de este estudio, se emplearon niveles de reemplazo del 15%, 20% y 25% en cilindros de prueba con dimensiones de 300 mm de altura y 150 mm de diámetro. La tabla 4 presenta los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión a distintos períodos de curado, destacándose el reemplazo del 15% con valores cercanos a los obtenidos en las pruebas del concreto convencional. En cuanto a la resistencia a la flexión, la adición del 15% de vidrio mostró un incremento del 5% respecto a la muestra de referencia, registrando 18.44 MPa a los 28 días (Alayo & Quezada, 2022).

Desde otro enfoque, Arango & Zapata (2013) aborda la influencia de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas del concreto, considerando reemplazos en cantidades escalonadas del 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% y 2.5% con respecto al peso total de la mezcla. Basándose en sus investigaciones, en términos de trabajabilidad, establecen una relación inversamente proporcional entre el asentamiento de la mezcla y el porcentaje de reemplazo. En lo que respecta a la resistencia a la compresión, se observan valores similares a los de la mezcla sin contenido de vidrio, a excepción de la mezcla con un 1.5%, cuyo resultado es ligeramente superior, aunque no significativamente. En cuanto a la resistencia a la flexo-tensión, presentan los datos en la figura 6, con edades de curado de 7 y 28 días, resaltando el contenido del 1.5% de agregado por su influencia

en el aumento del valor de resistencia con respecto al concreto convencional de 4.5 MPa (Arango & Zapata, 2013).

Tabla 4.

Resistencia a la compresión de cilindros hechos en concreto con adición de vidrio triturado (MPa).

% de reemplazo	Tiempo de curado (días)		
	7	14	28
0	12.87	15.01	19.12
15	13.90	14.30	19.30
20	10.73	10.70	12.40
25	11.17	11.78	12.76

Por otro lado, la resistencia a la tensión muestra un aumento notable a partir del reemplazo con un 1% de vidrio molido. De manera similar, el comportamiento del módulo de elasticidad experimentó un aumento del 16% con la adición de un 1% de reemplazo, mientras que con adiciones del 1.5% y 2%, este valor disminuye considerablemente en comparación con la mezcla de origen convencional.

En la misma línea de investigación, B. Langier et al (2023), quienes investigan el desempeño mecánico y la durabilidad del concreto mediante la incorporación de vidrio. Se lleva a cabo pruebas con porcentajes de reemplazo del 15%, 30%, 45% y 60%, señalando de manera enfática el potencial perjudicial de utilizar valores elevados de reemplazo, como el 60%, ya que resulta en una disminución significativa de la resistencia a la compresión y a la tracción (Langier et al. 2023). Otros, presentan un estudio con períodos de curado más prolongados, donde se analiza el desarrollo de la resistencia a la compresión a lo largo de los días, ilustrado de manera gráfica en la figura 5 (Epure et al., 2023).

3.5.4 Polímeros reciclados

La valorización de polímeros reciclados ha experimentado un notable crecimiento en la actualidad, impulsado por la considerable producción de estos materiales y la imperante necesidad de reducir los residuos asociados. En el ámbito de la fabricación de concreto, se están explorando opciones de formulación que incorporen estos polímeros reciclados, con el objetivo de aprovecharlos y contribuir a la mitigación de la contaminación. En este contexto, diversos autores han centrado su interés en investigar dichas alternativas.

La investigación llevada a cabo por Mitrosz et al. (2023) y otros autores se centra en la utilización de fibras poliméricas y su impacto en la resistencia a la compresión, flexión, módulo elástico y permeabilidad de los concretos fabricados con polímeros reciclados (Mitrosz et al. 2023). Para este propósito, se emplearon fibras de polímero con una estructura multifilamento de longitud de 54 mm. Se adicionaron 2 kg/m³ de estas fibras a la mezcla, lo que resultó en mejoras significativas en la resistencia a la compresión y a la tracción, registrando incrementos del 23.4% y 25.0%, respectivamente, en comparación con la mezcla convencional.

Figura 5.

Resistencia a la compresión en concreto con adición de vidrio triturado (MPa)

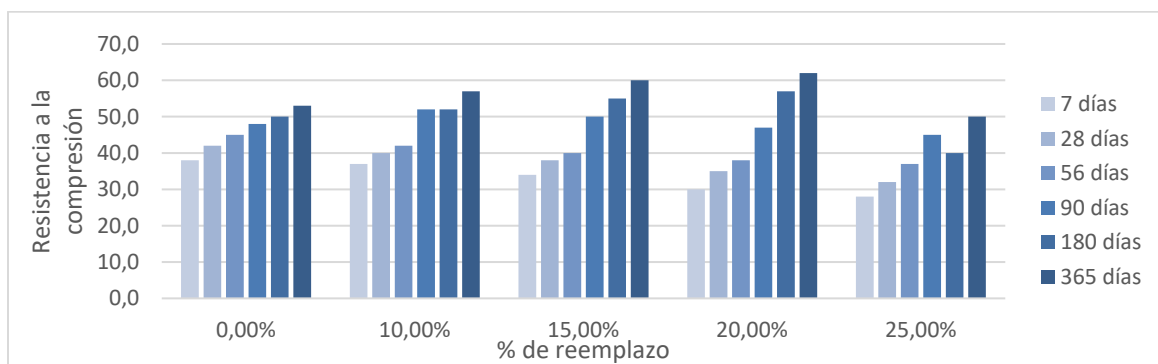
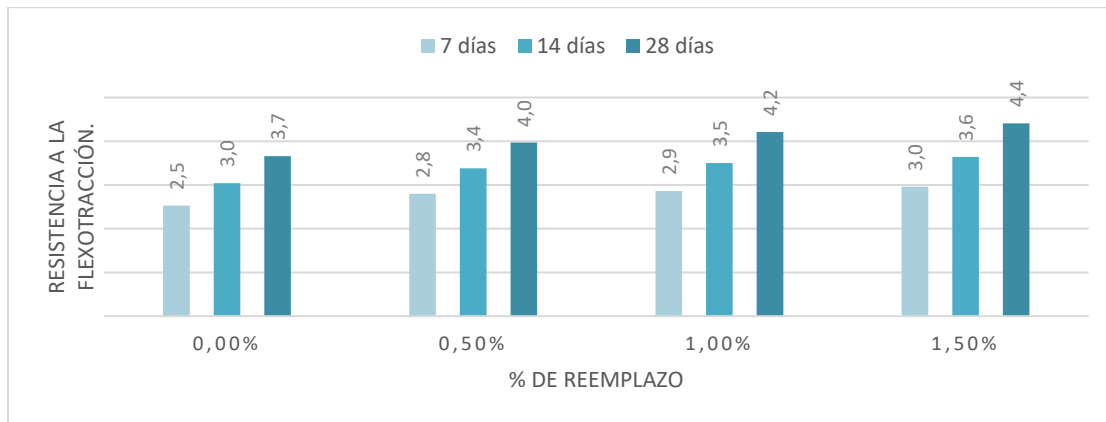


Figura 6.

Resistencia a la flexo-tracción en concreto con adición de vidrio triturado (MPa).



Por otra parte, se llevaron a cabo estudios utilizando residuos de plástico (PET) como reemplazo del 25% y 50% del agregado fino. Se determinó lo siguiente: en la prueba de asentamiento, se indicó que el aumento del contenido de PET reduce la trabajabilidad de la mezcla debido a la forma irregular en la que se presenta el material. Además, se realizaron estudios de resistencia a la compresión a los 90 días de curado, cuyos resultados se reflejan en la tabla 5. Se observa una notable disminución en la resistencia a la compresión a medida que se incrementa el porcentaje de reemplazo, atribuido a las formas planas del material que dificultan la adherencia de la pasta de cemento al agregado utilizado (Qaidi, 2023).

Tabla 5.

Reducción de la resistencia a la compresión de concreto fabricado con reemplazo de residuos de plástico frente al concreto de origen convencional a los 90 días de curado.

Resistencia a la compresión	
Reemplazo	Reducción
25.0%	43.46%
50.0%	76.12%

Nota. Adaptado con base en la investigación de (Qaidi, 2023).

Las características mecánicas de la mezcla representan factores determinantes para la durabilidad del concreto. En este contexto, Manhanpally et al (2023), han llevado a cabo una evaluación de la durabilidad del concreto al emplear polímeros como sustitutos del agregado grueso. El resultado principal de este análisis es la disminución de la resistencia a la compresión, a la tensión y a la flexión en un 14%, 13% y 16%, respectivamente, en comparación con una mezcla de concreto convencional (Manhanpally et al, 2023).

3.5.5 Residuos de construcción y demolición

Los residuos generados por la construcción y demolición representan una fracción sustancial de los materiales presentes en nuestro planeta, resultado del significativo progreso civilizatorio de las últimas décadas. Existe un interés creciente en utilizar estos residuos como sustitutos de agregados en la fabricación de mezclas de concreto, con el objetivo de aprovechar sus propiedades y características inherentes. Este enfoque busca reducir la cantidad de desechos generados y, al mismo tiempo, fomentar opciones más económicas y respetuosas con el medio ambiente para la producción de concreto.

En un primer análisis, Lacerda et al (2023) investigan las propiedades mecánicas y la durabilidad de concretos fabricados con un reemplazo del 50% y 100% de material proveniente de residuos de construcción y demolición. Posteriormente a la realización de pruebas de resistencia a la compresión y absorción de agua a los 7 y 91 días, se observa una disminución de la resistencia a la compresión entre el 8% y 18% en comparación con la muestra convencional, debido a las propiedades iniciales del material utilizado como reemplazo (Lacerda et al, 2023). Asimismo, la absorción de agua presenta un mayor porcentaje en ambos períodos de curado. En consonancia, Zrar et al (2023) empleando las mismas proporciones de reemplazo, establecen una relación inversamente proporcional entre la resistencia a la compresión del concreto y la cantidad de material utilizado como sustituto (Zrar et al, 2023).

Por otro lado, los análisis realizados por Tokareva et al (2017) indican que al reemplazar un 20% de los materiales convencionales por residuos de demolición, como finos de cribado de concreto, lodos procedentes del lavado de áridos reciclados y finos de cribado mixtos de concreto y cerámica, se obtienen propiedades mecánicas similares a las de las muestras convencionales. Se registran valores de 37.93 MPa, 46.25 MPa y 51.33 MPa para las resistencias a la compresión a los 7, 28 y 90 días de curado, respectivamente (Tokareva et al., 2017).

Con base en lo expuesto, se puede concluir que los residuos derivados de este tipo de material pueden representar una opción viable, siempre y cuando las propiedades iniciales que poseen sean óptimas, de manera que contribuyan a mantener la misma calidad en la mezcla de concreto final.

3.5.6 Nanomateriales

Con la introducción de nanomateriales en el ámbito de la construcción, se busca abordar estudios que proporcionen datos fundamentales a partir de investigaciones, permitiendo una comprensión más profunda del comportamiento de estos materiales en pos de aprovechar su aplicación. En este contexto, se han llevado a cabo diversas investigaciones con el objetivo de recopilar información exhaustiva al respecto, como es el caso del estudio a manos de L. Molina & M. Garzón. Este estudio de revisión bibliográfica destaca los distintos tipos de nanomateriales que pueden ser implementados en las mezclas de concreto y su potencial para mejorar sus propiedades (Molina & Garzon, 2017).

Por otro lado, Stefanidou & Papayianni (2012), investigan las propiedades del concreto al incorporar nano-sílice en cantidades de 3% y 6% (Stefanidou & Papayianni, 2012). Se destaca el incremento uniforme en la resistencia a la compresión y el tiempo de curado en comparación con la mezcla de referencia. De manera similar, Wang et al (2012) llevan a cabo el reemplazo con nano-carbonato de sodio, con una cantidad máxima del 2.5%, realizando pruebas de compresión a los 7 y 28 días de curado (Wang et al., 2012).

Adicionalmente, otro nanomaterial empleado es el Nano – trióxido de aluminio, abordado en la investigación de Li et al (2006). Se realizaron pruebas a edades de 3, 7 y 28 días, destacándose que con un reemplazo del 7%, la resistencia a la compresión aumenta en un 30% respecto a la mezcla de origen convencional. Además, el módulo de elasticidad, bajo la influencia de un 5% de reemplazo, alcanza valores máximos de 154%, 241% y 243%, respectivamente (Li et al., 2006).

3.6 Desarrollo del Tercer Objetivo Específico

Finalmente, se plantea el objetivo de indicar los efectos del uso de materiales alternativos en la fabricación de compuestos cementicios sobre su durabilidad, para ello se cita a Rico y otros, donde establecen que el comportamiento y gestión de los materiales alternativos sobre la durabilidad del cemento es relativo, porque según el contexto, puede mejorar la durabilidad del cemento y las estructuras del concreto, y en casos puede afectar su estructura (Rico et al. 2020).

Por ejemplo, la adición de escoria de alto horno o cenizas volantes puede reducir la porosidad del concreto, mejorar su resistencia a la corrosión y aumentar su durabilidad en ambientes agresivos, como climas cambiantes, o aquellos que están expuestos a agua salina o productos químicos agresivos, siendo estoy muy positivo pero que también puede afectar otros aspectos como la flexibilidad, tiempo de secado o facilidad de mezcla del producto.

Entonces, la premisa ahonda en que, en otros casos, la estructura del producto final se puede ver afectada, por ejemplo, si se utilizan materiales como vidrio triturado, se crea una reacción alcalí-silice, porque muy seguramente este tendrá contenido de impurezas o que no cumplen con ciertas normas de calidad, pueden introducirse elementos que promuevan la corrosión de las armaduras de acero en el concreto, lo que podría llevar a problemas de durabilidad a largo plazo, además, en la reacción expansiva se creen grietas que no den consistencia a la estructura final.

De igual forma, se explica que la alternativa de agregados convencionales basada en únicamente vidrio triturado no es lo más eficiente, de hecho, entre los hallazgos, los autores demostraron que al aplicar vidrio triturado como material alternativo en la producción de cemento, la resistencia del concreto se reducirá en la misma proporción, es decir, que si el 50% de agregados

finos se reemplazan por vidrio triturado, la estructura final, tras 21 días de secado aproximadamente, en algunos casos desde los 11 días o hasta los 32, la resistencia se reducirá al 50%. Dicho esto, los autores llegaron a la conclusión que el concreto producido con base en vidrio triturado como alternativa de agregados finos convencionales, es una gran opción para casos donde el concreto no será estructural, y no debe ser resistente a esfuerzos, por ejemplo, idóneo para estructuras livianas, esculturas, partes decorativas y demás aspectos que no sostengan mucho peso sobre ellas (Fernandez & Novoa, 2022).

Esta opción es prometedora porque una de las principales ventajas de utilizar vidrio triturado en lugar de agregados convencionales es la reducción de la huella de carbono y reducir la dependencia de la caliza, lo cual permite preservar los ecosistemas locales y reducir el agotamiento de los recursos naturales.

De igual forma, es importante considerar los desafíos asociados con la adición de vidrio triturado en la producción de cemento, como el caso de la pérdida de resistencia del producto final, y no puede ser utilizado para cualquier escenario. De hecho, el vidrio triturado si puede mejorar la durabilidad del concreto porque da una mayor firmeza a la corrosión, y también puede influir en la trabajabilidad y el tiempo de fraguado, pero esto es aplicable a situaciones específicas (Fernandez & Novoa, 2022).

Por parte estética, sí puede influir en el color del cemento, pero esto es algo complementario y no es tan relevante al final del proceso. Desde otra óptica, la incorporación de cáscara de arroz y/o cáscara de coco como alternativas en la producción de cemento es una estrategia potencial por el impacto ambiental, la mejora en características y el desempeño del cemento, reemplazando los agregados convencionales, sin embargo, esto no significa que no haya retos ligados a la fabricación.

La premisa es que los agregados convencionales generan impactos ambientales muy negativos, y en la producción de cemento se busca ser integrales, por lo cual, la cáscara de arroz y de coco, previamente triturada, permiten reducir la huella de carbono generando menos emisiones de CO_2 .

El primer impacto en la utilización de cáscara de arroz y cáscara de coco como alternativas de agregados finos en la producción de cemento es en lo económico, porque estos materiales suelen estar disponibles a bajo costo, ya que son subproductos agrícolas que a menudo se desechan o se queman de manera incontrolada (Cataño et al., 2021), lo que puede ser perjudicial para el medio ambiente, y al darles un valor económico como materiales para la producción de cemento, se puede crear un ciclo de economía circular beneficioso para las comunidades agrícolas.

La problemática y el desafío nace, cuando se evalúan los desempeños del producto, demostrando que tienen menor resistencia, menor adherencia y que incluso tienen impacto con el tiempo de secado del cemento, lo cual es un reto para la construcción porque lo que define el cemento como la materia prima por excelencia son esas cualidades, que, si se suprimen por reducir costos y mejorar la huella de carbono, no es rentable y no es funcional.

En ese sentido, debe haber un equilibrio, y como se ha demostrado durante el desarrollo del proyecto, no se deben eliminar de forma radical los agregados convencionales, finos y gruesos de la producción de cemento, esto debe ser paulatino y evaluar las alternativas, así como la utilización del producto final, si es para estructura, adoptar mayor vidrio triturado, si es para diseño estructural que deba ser resistente a la corrosión y con firmeza, evaluar poca cáscara de arroz pero más polímeros reciclados. En cada escenario se debe evaluar las variables involucradas y tomar las decisiones de forma objetiva.

El uso de estos materiales alternativos de forma aleatoria, sin evaluar las características que daban los agregados convencionales reemplazados, puede afectar la resistencia del cemento y el concreto a ataques químicos, como la exposición a ácidos o sulfatos, pues dependiendo de la naturaleza química de los materiales alternativos, estos pueden ser beneficiosos o perjudiciales en términos de durabilidad, resistencia, permeabilidad e incluso tiempo de secado.

4. Conclusiones

La producción de cemento es esencial para el desarrollo de infraestructuras y edificios en todo el mundo, pero enfrenta desafíos significativos, como el impacto ambiental, los altos costos y la eficiencia del producto final. Por lo tanto, es crucial identificar materiales alternativos para reemplazar los agregados en la fabricación de compuestos cementicios, ya que estos determinan las características del producto, como resistencia, dureza, permeabilidad, resistencia a la corrosión y tiempo de mezcla.

Los agregados convencionales (finos y gruesos) no pueden ser reemplazados radicalmente, ya que esto podría plantear incertidumbres sobre el desempeño a largo plazo del concreto. A partir de la literatura, se identifican materiales prometedores como neumáticos triturados, vidrio triturado, cáscaras de arroz y coco, polímeros reciclados, escorias de alto horno, cenizas volantes, fibras de carbono y residuos de construcción, cada uno brindando diferentes desempeños al concreto como producto final.

Por ejemplo, el neumático triturado puede reemplazar agregados gruesos y permite reducir la huella de carbono por el alto nivel de residuo que genera. Sin embargo, al concreto le hace perder adherencia y resistencia, lo cual se debe evaluar en el ámbito de aplicación, de igual modo, el vidrio triturado puede ser una solución innovadora, pero esto da una potencial reacción alcalí-silice, que hace que el producto final de concreto posea grietas y pierda resistencia, por lo cual, no es tan eficiente en condiciones estructurales.

La escoria de alto horno, las cenizas volantes y los nanomateriales, son alternativas prometedoras para reemplazar los agregados convencionales esto porque mejoran resistencia y durabilidad del producto final, al tiempo que reduce demanda de agregados naturales, brindando un impacto ambiental positivo, también mejoran resistencia a la compresión, alta durabilidad y menor porosidad. Sin embargo, son materiales cuyo costo no es tan económico como los neumáticos, las cáscaras de arroz y coco o el vidrio triturado, y hay que evaluar la mejor opción.

El problema identificado entonces en cada escenario, es que se trata de algo muy relativo a la calidad del material alternativo que reemplazará el agregado convencional, pues hay dependencia del nivel de impurezas que tenga, en algunos casos, estos compuestos pueden mejorar la durabilidad del cemento y las estructuras de concreto, en otros, pueden incluso afectar su permeabilidad y dureza. En todo caso, el impacto ambiental si se ve mejorado, aunque se debe buscar el equilibrio en cada factor, esto conforme a la utilización del concreto, y las condiciones en las cuales se lleva a cabo.

5. Recomendaciones

Después de un análisis exhaustivo de los materiales como posibles sustitutos de agregados tanto gruesos como finos y su influencia en las propiedades mecánicas del concreto, se destaca que algunos de estos materiales ofrecen beneficios significativos en comparación con sus efectos negativos. Por lo tanto, se recomienda a futuros investigadores centrarse en estos materiales prometedores, profundizando en su estudio y abordando las posibles limitaciones para encontrar soluciones óptimas. Esto permitirá avanzar en la evaluación de las propiedades del concreto estructural bajo la influencia de nuevos materiales alternativos como agregados finos y gruesos, buscando un equilibrio entre el impacto social y cultural del concreto y su huella ambiental.

Referencias Bibliográficas

- Acevedo Jaramillo, A. B., & Posada Franco, J. E. (2019). Polietileno tereftalato como reemplazo parcial del agregado fino en mezclas de concreto. *Rev. ing. universidad Medellín*, vol 18, núm 34, 45-56.
- ACI Committee. (2019). *Guide to Durability by Chemical Resistance*. American Concrete Institute.
- Alayo, M., Quezada, C. (2022) «Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c=175$ kg/cm² adicionando vidrio molido reciclado, La Libertad, 2022», tesis, *Univ. Cesar Vallejo*, Trujillo,.
- Alexander, M., & Bertron, A. (2012). Durability of concrete in marine environments. *RILEM Technical Letters*, 2, 67.
- Allalou, S., Kheribet, R., & Benmounah, A. (2019). Effects of calcined halloysite nano-clay on the mechanical properties and microstructure of low-clinker cement mortar. *Case Studies in Construction Materials*, 10(1), 213-224, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00213>.
- Alva J. y Quesquen, K. (2020) «Utilización de residuos de construcción como material alternativo en edificaciones de viviendas sostenibles en Nuevo Chimbote,» *Repositorio UNS [tesis de pregrado]*, <https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/3656>
- Anshuman, T., Sarbjeet, S., & Ravindra, N. (2016). Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: a review. *Journal of Cleaner Production*, 18.

- Antunes, M., Santos, R., Pereira, J., Rocha, P., Horta, R., & Colaco, R. (2021). Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review. *Materials* 2022, 15(1), 209-214, <https://doi.org/10.3390/ma15010209>.
- Arango ,S. y Zapata, J. (2013) «Influencia de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas de mezclas de concreto», *Trabajo de grado, Univ. EAFIT*, Medellín
- ASOCEM. (2016). Panorama mundial de la industria del cemento. Perú: Desconocido.
- Banibayat, P., & Patnaik, A. (2013). Strength and behavior of carbon fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 44, 736-741.
- Basquirotto de Souza, F., Klegues Montedo, O. R., Grassi, R. L., & Pavei Antunes, E. G. (2019). Lightweight high-strength concrete with the use of waste cenosphere as fine aggregate. *Rev. Matéria* Vol 24, núm 4, 12.
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 142-161.
- Benítez Soxo, W. I. (2022). Materiales compuestos cementicios reforzados con tejidos de fibra natural aplicados en estructuras de hormigón armado, estudio de revisión (Bachelor's thesis, Riobamba, Universidad Nacional de Chimborazo). <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/9055>
- Bentz, D. P., Peltz, M. A., & Winpigler, J. (2017). Early-age properties of cement-based materials: II. Influence of water-to-cement ratio on hydration. *Journal of the American Ceramic Society*, 100(1), 512-524. Bucaramanga: UPB.
- Berndt M. L., (2009) «Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate», *Construction Building Mater.*, vol. 23, n.º 7, pp. 2606–2613

- Borda L., Mendoza C., Garrido J. y de la Cruz. S. (2022) «Resistencia a compresión simple del concreto con yeso y residuos de conchas de abanico,» *Revista Boliviana de Química*, vol. 39, nº 1, pp. 231-244.
- Burgos Galindo, D. M., Guzmán Aponte, Á., & Torres Castellano, N. (2019). Desempeño mecánico y durable de concretos que incorporan agregado reciclado fino comercial. *EIA*, ISSN 1794-1237, vol 16, núm 32, 167-179.
- Cabrera, S., Aranda, Y., Suárez, J., & Rotondaro, R. (2020). Bloques de Tierra Comprimida (BTC) estabilizados con cal y cemento. Evaluación de su impacto ambiental y su resistencia a compresión. *Revista hábitat sustentable*, 10(2), 154-168, <http://dx.doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.05> .
- Casasempere, A. (2020). Análisis documental bibliográfico. Obteniendo el máximo rendimiento a la revisión de la literatura en investigaciones cualitativas. *New Trends in Qualitative Research*, 4, 247–257 <https://publi.ludomedia.org/index.php/ntqr/article/view/44>.
- Castro, M., & Navarro, J. (2019). Análisis de mejora de suelos arcillosos de alta plasticidad a nivel de subrasante mediante adición de cemento Portland para disminuir el cambio volumétrico. *Repositorio de la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas [tesis de pregrado]*, <http://hdl.handle.net/10757/626119>.
- Cataño J., Perpiñan M y Guzman K. (2021) «Efecto de la incorporación de cascarilla de arroz sobre las propiedades mecánicas de concretos y bloques de suelo cemento. Una Revisión Sistemática». *Trabajo de grado*. Medellín
- Cendoya, P. (2009). Efecto en la resistencia de las escorias de fundición de cobre como agregado fino en el comportamiento resistente del hormigón. *Revista chilena de*

- Cevallos, O.-A., Marcillo, C., & Miño, A. (2018). Improvement of the mechanical properties of a cementitious composite system using a designed sisal fabric. *Perfiles*, 2(20), 21-32. <https://doi.org/10.47187/perf.v2i20.28> con agregado fino de CBC y FO tratada con Silano. *Rev. Ingeniería Investigación y Tecnología*, Vol XXI, núm 1, 1-11.
- Chandrasekhar, S. A. T. H. Y., Satyanarayana, K. G., Pramada, P. N., Raghavan, P., & Gupta, T. N. (2003) «Review processing, properties and applications of reactive silica from rice husk—an overview,» *Journal of materials science*, Vol. 38, pp 3159-3168.
- Concreto. Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto#:~:text=Clasificaci%C3%B3n%20por%20tama%C3%B1o%20de%20part%C3%ADcula,-Esta%20identificaci%C3%B3n%20de&text=De%20acuerdo%20al%20tama%C3%B1o%20de,la%20malla%20de>
- Concreto. Recuperado el 04 de 01 de 2021, de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto#:~:text=Clasificaci%C3%B3n%20por%20tama%C3%B1o%20de%20part%C3%ADcula,-Esta%20identificaci%C3%B3n%20de&text=De%20acuerdo%20al%20tama%C3%B1o%20de,la%20malla%20de>
- Cruz Hernández, R. A., Pico Cortés, C. M., & Pérez Bustos, L. (2015). Durabilidad y acústica del concreto con escoria de cubilote como reemplazo del agregado fino. *Tecnura*, Vol. 19, núm 43, 37-51.

- Davidovits, J. (1994). Properties of geopolymer cements. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, 131-149.
- De la Cruz Acosta, F. J., Sáenz López, A., & Cortés Martínez, F. (2015). Concreto Ligero utilizando Cáscara de Nuez. *Rev. de Arquitectura e Ingeniería*, vol. 9, núm. 1, 1-11.
- Duda, W. (2021). Manual tecnológico del cemento. *Editorial Reverté S.A., quinta edición, p. 32*, Barcelona.
- Epure C., Munteanu C., Istrate B., Harja M. y Buium F. (2023) «Applications of recycled and crushed glass (RCG) as a substitute for natural materials in Various Fields—A Review», *Materials*, vol. 16, n.º 17, p. 5957
- Escalante-García, J. I., & Sharp, J. H. (2001). The chemistry of limestone: Its effects on Portland cement clinker. *Cement and Concrete Research*, 31(3), 459-465.
- Farfán Córdova, M., Pinedo Diaz, D. I., Araujo Novoa, j., & Orbegoso Alayo, J. (2019). Fibras de acero en la resistencia a la compresión del concreto. *Gaceta TTécnica*, vol. 20, Núm 2, 4-13.
- Fernández, A., & Novoa, F. (2022). Influencia de la aplicación de vidrio triturado en el comportamiento mecánico del concreto para elementos no estructurales - Piura, 2021. *Repositorio de la Universidad César Vallejo [tesis de pregrado]*, <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/119539>.
- Fernandez, B., Gutierrez, M., & Rojas, D. (2020). La huella de carbono del proceso de extracción de materia prima para la producción del cemento, ladrillo y acero. *Repositorio Institucional de la UCC [tesis de pregrado]*, URI: <http://hdl.handle.net/20.500.12494/28395>.

- Glasser, F. P., Marchand, J., & Samson, E. (2008). Durability of concrete—Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 226-246.
- Godínez, D., Rodríguez, A., González, O., & Caparrós, Y. (2022). Evaluación ambiental en la comercializadora de Cemento Camagüey. *Energías Renovables Y Medio Ambiente*, 49, 17-20, URI: <https://portalderevistas.unsa.edu.ar/index.php/erma/article/view/3382>.
- Granados, S., Alcalde, C., Guzman, J., Melendez, D., Torres, C., & Velasquez, Z. (2022). Cementos a base de silicato de calcio: factor clave en el éxito del recubrimiento pulpar directo. Revisión de la literatura. *Revista Estomatológica Herediana*, 32(1), 201-217, <http://dx.doi.org/10.20453/reh.v32i1.4183>.
- Gudiel, E., & Monzó, M. (2020). Escorias de fundición de cobre usadas en matrices de cemento Portland como puzolana alternativa. *Simposio UNSAAC*, 2(1), 1-11, <https://proyectofortalecimientodelsinacti.prociencia.gob.pe/wp-content/uploads/2021/02/EGudiel-1.pdf>.
- Guerrero Vargas, D. A., & Chaves García, D. A. (2013). Evaluación de las propiedades mecánicas de concreto simple (3000psi) utilizando ceniza como porcentaje del cemento.
- Guevara, G. P., Verdesoto, A. E., & Castro, N. E. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *RECIMUNDO*, 4(3), 163-173, DOI: [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173).
- Gunasekaran, K., Kumar, P. S., & Lakshmiathy, M. (2015). Mechanical and bond properties of coconut shell concrete. *Construction and Building Materials*, 93, 471-476.

- Hernandez Cano, H. B. (28 de Enero de 2013). GEOSEISMIC. Obtenido de Supervisión de estructuras de concreto y de acero: <http://www.geoseismic.cl/propiedades-del-concreto/> Ingeniería, 17 (1), 85-94.
- Huapalla, M., & Fonseca, W. (2020). Propuesta de utilización de estructuras prefabricadas en concreto armado para la construcción de edificios multifamiliares. *Revista Científica de la UPC*, 6(1), 16-34, <http://hdl.handle.net/10757/648666>.
- J. Franco, M. Martínez, L. Hernández, D. Arévalo, M. Herrera y C. Gómez. (2022) Análisis de la Resistencia a Corte de Conectores Tipo Ángulo en Losas de Hormigón Armado sobre Estructura Metálica.,» *Revista Tecnica de la Facultad de Ingenieria de la Universidad del Zulia*, 45(1), 36-47, p.
- Juela, D., Bermeo, J., & Alvarez, D. (2020). Resistencia a la compresión y resistividad eléctrica de hormigones elaborados con materiales cementicios suplementarios y agregados reciclados. *Revista Ingeniería De Obras Civiles*, 10(1), 32–44. <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/article/view/2129>
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & Panarese, W. (2003). Design and control of concrete mixtures. Portland Cement Association.
- Lacerda Gomes C., Valle Salles P., Da Silva Bezerra A. C., De Souza Rodrigues C. y Jacques Poggiali F. S., (2023) «Mechanical and durability properties of concrete produced with construction and demolition waste and rice husk ash», *Construction Building Mater.*, vol. 406, p. 133471
- Langier B., Katzer J., Major M., Halbiniak J. y Major I., (2023) «Strength and durability characteristics of concretes with crushed side window glass as partial aggregate substitution», *Archives of Civil Engineering*.

- León, L., Torres, L., & Rodríguez, C. (2020). Disminución del contenido de cemento a partir de un diseño de mezcla en la Unidad de Servicios Básicos Hormigón. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 14(2), 230-246, <https://www.redalyc.org/journal/1939/193963490005/193963490005.pdf>.
- Li, G., Wang, P. M., & Zhao, X. (2004). Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes. *Carbon*, 43(6), 1239-1245.
- Li, H., Zhang, M.-H., & Ou, J.-P. (2006) «Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement». *An International Journal on the Science and Technology of Friction Lubrication and Wear*, 260(11–12), 1262–1266. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.08.006>
- Londa, B. (2023). Diseño conceptual de materiales cementicios multifuncionales. *Treballs acadèmics*, 51(1), 1-94, URI: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/390154>.
- Lopez Díaz, A., Ochoa Díaz, R., & Grimaldo León, G. E. (2018). Use od BOF slag and blast furnace dust in asphalt concrete: an alternative for the construction of pavements. *Rev. DYNA*, 85(206), 24-30.
- López, L., & Sepúlveda, D. (2019). Caracterización física de diferentes muestras de Agregados Pétreos para el Concreto . *Repositorio Institucional Universidad Católica de Colombia [artículo de investigación]*, <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5459d72d-a9ca-477c-990a-edb216399a05>.
- Malhotra, V. M. (1993). Fly Ash, Slag, Silica Fume, and Rice Husk Ash in Concrete: A Review. *Concrete International*, 15(4), 23-28.

- Manhanpally N., Nagarajan P., Saha S. y Yunus Raja I., (2023) «Mechanical and durability characteristics of GGBS-Dolomite geopolymer concrete using recycled coarse aggregates», *Mater. Today: Proc.*
- Mantilla, M., Villamizar, A., Ruiz, S., & Zapata, E. (2019). Iron slag as fine aggregate replacement and nanosilica particles in selfcompacting concrete mixture. *Journal of Physics: Conference Series (1386)*, 1-8, doi:10.1088/1742-6596/1386/1/012032.
- Mantilla, M., Villamizar, A., Ruiz, S., & Zapata, E. (2019). Iron slag as fine aggregate replacement and nanosilica particles in selfcompacting concrete mixture. *Journal of Physics: Conference Series (1386)*, 1-8, doi:10.1088/1742-6596/1386/1/012032.
- Mastropiero, M. (2021). El hormigón para arquitectos. *Editorial la Edición Diseño, Segunda Edición*, p. 61, La Plata, Argentina.
- Mehta, P. K. (2002). Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development. *Concrete International*, 24(7), 23-28.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. McGraw-Hill Education.
- Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, Vol 2, núm 2, 35-47.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall.
- Mitrosz O., Kurpińska M., Miśkiewicz M., Brzozowski T. y Abdelgader H. S., (2023) «Influence of the Addition of Recycled Aggregates and Polymer Fibers on the Properties of Pervious Concrete», *Materials*, vol. 16, n.º 15, p. 5222.

- Molina O., (2008) «La influencia de las cenizas volantes como sustituto parcial del cemento portland en la durabilidad del hormigón», tesis doctoral, *Univ. Politec. Madr.*, Madrid
- Molina-Prieto, L. F., & Garzón Castellanos, M. F. (2017) «Propiedades de concretos y morteros modificados con nanomateriales: estado del arte». *Arquetipo*, Vol. 14, pp. 81–98..
<https://doi.org/10.31908/22159444.3522>
- Moreno Anselmi, L. Á., Ospina García, M. Á., & Rodríguez Polo, K. A. (2019). Resistencia de concreto con agregado de bloque de arcilla triturado como reemplazo de agregado grueso. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 27, núm. 4, 635-642.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Prentice Hall.
- NTC174. (2000). Especificaciones de los agregados para concretos.
- Osborne G. J., (1999) «Durability of Portland blast-furnace slag cement concrete», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 21, n.º 1, pp. 11–21,
- Osorio Saraz, J. A., Varón Aristizabal, F., & Herrera Mejía, J. A. (2007). Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar. *Dyna*, Año 74, núm 153, 69-79.
- Oyen, D. J. (2019). Tensile strength and fracture of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 214, 400-408.
- Pastrana Ayala, J., Silva Urrego, Y., Adrada Molano, J., & Delvasto Arjona, S. (2019). Propiedades físico-mecánicas de concretos autocompactantes producidos con polvo de residuo de concreto. *Informador Técnico*, 82(2), 174-190.
- Pérez, A. (2019). Optimización de estructuras prefabricadas de hormigón para la construcción de edificios industriales. *Sociedad y Economía*, 21(6), 68-79, URI:
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=255511>.

- Petroche, D. (2021). Desempeño ambiental del cemento y del concreto en el Ecuador una puerta a la construcción sostenible. *Repositorio Institucional de la ESPOL [tesis de Maestría]*, URI: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/52614>.
- Petroche, D., & Ramírez, A. (2022). The environmental profile of clinker, cement, and concrete: A life cycle perspective study based on Ecuadorian data. *Buildings 2022*, 12(3), 311-321, <https://doi.org/10.3390/buildings12030311>.
- Powers, T. C. (1959). Estructura y propiedades físicas de la pasta de cemento, fraguado. *Materiales de construcción*, Vol. 9, núm 93, 31-34.
- Qaidi S. et al., (2023) «Investigation of the physical-mechanical properties and durability of high-strength concrete with recycled PET as a partial replacement for fine aggregates», *Frontiers Mater.*, vol. 10,.
- Ramírez, A. (2017). Inversión en infraestructura vial y su impacto en el desarrollo económico: Un análisis al caso Colombia . *Repositorio Institucional Universidad Nacional de Colombia [artículo de investigación]*, <http://bdigital.unal.edu.co/51281/>.
- Rao, A., Jha, K. N., & Misra, S. (2007). Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(1), 71-81.
- Revista Semana. (2021). En Colombia, cada año 950.000 llantas usadas van a parar a la basura. *Sección Economía, Semana*, <https://www.semana.com/economia/inversionistas/articulo/en-colombia-cada-ano-950000-llantas-usadas-van-a-parar-a-la-basura/202129/>
- Rico Rodríguez, I., Vargas Galarza, Z., García Hernández, E., Salgado Delgado, R., Cárdenas Valdez, R. C., & Olarte Paredes, A. (2019). Evaluación térmica de material compuesto de cemento portland reforzado

- Rico, I., Vargas, Z., García, E., Salgado, R., Cárdenas, R., & Olarte, A. (2020). Evaluación térmica de material compuesto de cemento portland reforzado con agregado fino de CBC y FO tratada con Silano. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 21(1), 301-314, <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n1.001>.
- Rojas N., Bustamante M., Muñoz P., Godoy K. y Letelier V., (2023) «Study of properties and behavior of concrete containing EAF slag as coarse aggregate», *Develop. Built Environ.*, p. 100137
- S.K., K., Singh, S., & Chourasia, A. (2020). Alternative fine aggregates in production of sustainable concrete- A review. *Journal of Cleaner Production*, 268, 2020, 122089, 27.
- Saikia, N., & de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236-244.
- Salamanca Correa, R. (2001). La tecnología de los morteros. En I. R. Correa, La tecnología de los morteros (págs. 41-48). Bogotá: Univ. Nueva Granada.
- Sarmiento, J., & Rincón, C. (2020). Análisis del impacto del sector de la construcción en la economía colombiana. *Repositorio Institucional AEIPRO [tesis de pregrado]*, URI: <http://dspace.aeipro.com/xmlui/handle/123456789/2451>.
- Scrivener, K., Crumbie, A., & Laugesen, P. (2004). The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete. *Interface Science*, 12, 411-421.
- Siddique R., (2003) «Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete», *Cement Concrete Res.*, vol. 33, n.º 4, pp. 539–547
- Siddique R., (2008) «Waste materials and by-products in concrete», Berlin: Springer,.

- Sienkiewicz M., Janik H., Borzędowska K. Labuda, J. Kucińska-Lipka, (2017) «Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review,» *Journal of Cleaner Production*. Vol. 147, pp. 560-571..
- Silva M. y Castro A. (2022) «Efeito do procedimento de cura sobre o comportamento de concretos de ultraresistência,» *Livro de Resumos Expandidos* , vol. 31, nº 1, pp. 67-69,.
- Silva O., (2020) «Tipos de agregados y su influencia en mezcla de concreto,».
<http://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto>.
- Stefanidou, M., & Papayianni, I. (2012) «Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes». *Composites. Part B, Engineering*, 43(6), pp. 2706–2710
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.12.015>
- Taylor, H. F. W. (1997). Cement chemistry. Thomas Telford.
- Taylor, H., Famy, C., & Scrivener, K. L. (2020). Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, 134, 106068.
- Terreros Rojas, L. E., & Carvajal Corredor, I. L. (2016). Análisis de las propiedades mecánicas de un concreto convencional adicionadondo fibra de cáñamo. Bogotá D.C.: U. Católica de
- Tokareva A., Kaassamani S. y Waldmann D., (2017) «Fine demolition wastes as Supplementary cementitious materials forCO₂ reduced cement production», *Construction Building Mater.*, Vol. 147, pp. 560-571
- Valencia Villegas, J. P., González Mesa, A. M., & Arbeláez Pérez, O. F. (2019). Evaluación de las propiedades mecánicas de concretos modificados con microesferas de vidrio y residuos de llantas. *Lámpsakos*, núm 22, 16-26.

- Vasilachis, I. (2020). Estrategias de investigación cualitativa. *Gedisa*, 2(1), 81-87, <https://www.gedisa.com/gacetillas/240022.pdf>.
- Wang X., Wang K., Li J., Garg N. y Shah S. (2012). «Properties of self-consolidating concrete containing high volume supplementary cementitious materials and nano-limestone». *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*.
- Wenguang, X., Yang, L., Jiang, D., Liu, Z., & He, C. (2020). Mechanical and hydration properties of low clinker cement containing high volume superfine blast furnace slag and nano silica. *Construction and Building Materials*, 238(30), 117-141, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117683>.
- Wille, K., Naaman, A. E., & Parra-Montesinos, G. J. (2014). Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. *ACI Materials Journal*, 111(1).
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Ozawa Meida, L. (2001). Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry. *Annual Review of Energy and the Environment*, 26, 303-329.
- Xargay, H., Ripani, M., Caggiano, A., folino, P., & Martinelli, E. (2019). Uso de materiales reciclados en compuestos cementicios. *Tecnura*, vol. 23, núm. 60, 38-51.
- Xargay, H., Ripani, M., Caggiano, A., Folino, P., & Martinelli, E. (2019). Uso de materiales reciclados en compuestos cementicios. *Tecnura*, 23(60), 38-51. <https://doi.org/10.14483/22487638.14697>
- Yeau K. Y. y Kim E. K., (2005) «An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulate blast-furnace slag», *Cement Concrete Res.*, vol. 35, n.º 7, pp. 1391–1399,

- Zapata, L., Portela, G., & Suárez, O. (2014). Weibull statistical analysis of splitting tensile strength of concretes containing class F fly ash, micro/nano-SiO. *Ceramics International*, 40, 7373-7388, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.12.083>.
- Zapata, L., Portela, G., & Suárez, O. (2014). Weibull statistical analysis of splitting tensile strength of concretes containing class F fly ash, micro/nano-SiO. *Ceramics International*, 40, 7373- 7388, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.12.083>.
- Zapata, O., Portela, G., Suárez, M., & Cáceres, D. (2016). Compatibility analysis between Portland cement type I and micro/nano-SiO₂ in the presence of polycarboxylate-type superplasticizers. *CIVIL & ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, (3), 1-18, <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2016.1260952>.
- Zapata, O., Portela, G., Suárez, M., & Cáceres, D. (2016). Compatibility analysis between Portland cement type I and micro/nano-SiO₂ in the presence of polycarboxylate-type superplasticizers. *civil & environmental engineering*, (3), 1-18, <http://dx.doi.org/10.1080/23311916.2016.1260952>.
- Zega, C. J., Taus, V., & Di Malo, A. (2006). comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, Vol 44, núm 3, 13.
- Zega, C., & Di Malo, A. (2007). Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón. Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, vol 45, núm 3, 15.
- Zrar Y. J., Younis K. H. y Sherwani A. F. H., «Properties of sustainable self-compacted concrete with recycled concrete and waste tire crumb rubber aggregates», *Construction Building Mater.*, vol. 407, p. 133524, 2023.