



Universidad
Señor de Sipán

**FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA Y
URBANISMO**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**REVISIÓN SISTEMÁTICA DEL USO DE LAS
CENIZAS VOLANTES Y MICROSILICE EN LAS
CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE BACHILLER
EN INGENIERIA CIVIL**

Autores

Manayay Vilcabana Eden

<https://orcid.org/0000-0001-8031-0903>

Torres Pesantes Ronaldo Cristopher

<https://orcid.org/0009-0004-8069-6921>

Asesor

Dr. Muñoz Pérez Sócrates Pedro

<https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>

Línea de Investigación

**Tecnología e Innovación en el Desarrollo de la Construcción y la
Industria en un Contexto de Sostenibilidad**

Sublínea de Investigación

**Innovación y Tecnificación en Ciencia de los Materiales, Diseño e
Infraestructura**

Pimentel – Perú

2025

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Quien suscribe la DECLARACIÓN JURADA, somos **egresados** del Programa de Estudios de **INGENIERIA CIVIL** de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaramos bajo juramento que somos autores del trabajo titulado:

REVISIÓN SISTEMÁTICA DEL USO DE LAS CENIZAS VOLANTES Y MICROSILICE EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán (CIEI USS) conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación a las citas y referencias bibliográficas, respetando al derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y auténtico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

Manayay Vilcabana Eden	DNI: 77427282	
Torres Pesantes Ronaldo Cristopher	DNI: 70783712	

Pimentel, 23 de enero de 2025

14% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 7%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

A mi familia, cuyo apoyo incondicional me ha brindado la fortaleza y motivación para culminar este proyecto. A mis profesores y compañeros, por su constante orientación y colaboración.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi docente y asesor, por su valiosa orientación, paciencia y apoyo durante todo el desarrollo de este proyecto. Su experiencia y conocimientos fueron fundamentales para el éxito de esta investigación.

Índice

Dedicatoria.....	3
Agradecimientos	4
Resumen	6
Abstract.....	7
I. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1. Realidad problemática	8
1.2. Formulación del problema	9
1.3. Hipotesis.....	9
1.4. Objetivos	9
1.5. Teorías relacionadas al tema.....	10
II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	12
III. RESULTADOS	13
IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN.....	17
REFERENCIAS.....	20

Resumen

El concreto con microsílice y cenizas volantes es ampliamente investigado por su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas y su beneficio ambiental en la industria de la construcción. La microsílice, un subproducto del horno de producción de aleaciones de silicio, y las cenizas volantes, derivadas de la combustión de carbón, se utilizan como aditivos para optimizar la resistencia, durabilidad y sostenibilidad del concreto. El objetivo de esta revisión sistemática fue analizar los efectos de la microsílice y las cenizas volantes en las propiedades del concreto, así como su impacto ambiental. Se realizó una búsqueda de artículos publicados entre 2020 y 2024 utilizando bases de datos como SCOPUS y ScienceDirect. En total, se seleccionaron 46 artículos que abordaron las características físicas y químicas de estos materiales, sus efectos sobre el concreto y su beneficio ecológico. Los resultados mostraron que ambos aditivos mejoran significativamente las propiedades mecánicas del concreto, especialmente a dosis moderadas, y contribuyen a la sostenibilidad mediante la reutilización de desechos industriales. Se concluye que, aunque su uso mejora el concreto, debe ser cuidadosamente optimizado para evitar efectos adversos en dosis elevadas.

Palabras Clave: Propiedades mecánicas, concreto, microsílice, cenizas volantes, sostenibilidad.

Abstract

Concrete with microsilica and fly ash is widely researched for its ability to improve mechanical properties and its environmental benefit in the construction industry. Silica fume, a by-product of silicon alloy production furnace, and fly ash, derived from coal combustion, are used as admixtures to optimize the strength, durability and sustainability of concrete. The objective of this systematic review was to analyze the effects of silica fume and fly ash on the properties of concrete, as well as their environmental impact. A search for articles published between 2020 and 2024 was conducted using databases such as SCOPUS and ScienceDirect. In total, 46 articles were selected that addressed the physical and chemical characteristics of these materials, their effects on concrete and their ecological benefit. The results showed that both admixtures significantly improve the mechanical properties of concrete, especially at moderate doses, and contribute to sustainability through the reuse of industrial waste. It is concluded that, although their use improves concrete, they must be carefully optimized to avoid adverse effects at high doses.

Keywords: Mechanical properties, concrete, silica fume, fly ash, sustainability.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

El sector de la construcción ha experimentado un crecimiento sostenido en respuesta a las demandas de una población global que supera los 7 mil millones de personas [1]. No obstante, según Tripathy y Kumar [2], esta expansión ha generado un impacto ambiental significativo, ya que cerca del 75% de las emisiones globales relacionadas con el uso de energía provienen de esta actividad [3], lo que representa aproximadamente el 37% del total anual de emisiones de CO₂ [4]. Adicionalmente, Estokova y Fabianova [5], advierten que, entre 2020 y 2050, alrededor del 50% de las emisiones asociadas con nuevos edificios provendrán de las actividades de construcción. Ante esta realidad, se han desarrollado estrategias innovadoras que buscan reducir la huella de carbono y mejorar la eficiencia en la producción del concreto [6].

En este contexto, el aprovechamiento de subproductos industriales como el microsílíce (MS) ha surgido como una solución efectiva para promover prácticas más sostenibles en el sector de la construcción [7]. De acuerdo con Shelote et al. [8], la producción mundial de MS alcanza anualmente las 100,000 toneladas. La reutilización de este material no solo disminuye las emisiones de CO₂, sino que también reduce la explotación de recursos naturales [9]. Zawrah et al. [10], describen que el humo de sílice es un polvo ultrafino derivado de la industria del silicio metálico y las aleaciones de ferrosilicio, generado a temperaturas cercanas a los 1750 °C mediante la reducción de cuarzo puro con carbono en presencia de hierro [11]. Además, Ahmed y Ugur [12], destacan que el MS se compone principalmente de un 78.02% de SiO₂ y un 14.32% de MgO, junto con trazas de otros óxidos, lo que le confiere una alta reactividad puzolánica [13]. Su densidad aparente es de aproximadamente 200 kg/m³ [14].

Por otro lado, Bhagath y Durga [15], señalan que las cenizas volantes, un subproducto resultante de la combustión del carbón en centrales termoeléctricas,

también se están incorporando ampliamente en la construcción [16]. Según Assi et al. [17], la producción global de cenizas volantes asciende a 2800 millones de toneladas métricas anuales, con China generando cerca de 580 millones de toneladas y la India 169.25 millones [18]. Sin embargo, solo el 53% de estas cenizas se reutiliza de manera efectiva, mientras que el resto se acumula en terrenos o cuerpos de agua, lo que genera problemas ambientales asociados a su disposición [19, 20].

El objetivo de esta revisión sistemática es analizar y compilar la evidencia científica relacionada con el impacto del uso de cenizas volantes y microsílíce en las propiedades del concreto. Este análisis busca identificar las ventajas técnicas, económicas y ambientales que ofrece la incorporación de estos materiales como alternativas sostenibles en la construcción. La importancia de este estudio radica en su capacidad para aportar conocimientos clave que faciliten la adopción de prácticas responsables en el sector, reduciendo la dependencia de recursos naturales, disminuyendo las emisiones de carbono y promoviendo un enfoque de economía circular que contribuya al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es el efecto del uso de las cenizas volantes y microsílíce en las características del concreto?

1.3. Hipotesis

El uso de cenizas volantes y microsílíce mejora las características del concreto.

1.4. Objetivos

Objetivo general:

Realizar una revisión sistemática sobre el uso de las cenizas volantes y la microsílíce en las características del concreto.

Objetivos específicos:

- Revisar las características físicas y químicas de las cenizas volantes y microsílíce
- Revisar el comportamiento del concreto incorporando cenizas volantes y microsílíce respectivamente.
- Revisar el beneficio medioambiental de las cenizas volantes y microsílíce.

1.5. Teorías relacionadas al tema

El concreto está compuesto por cemento, arena y agregados, los cuales son los materiales fundamentales en su preparación. Los agregados naturales, como la piedra triturada y la arena extraída de formaciones rocosas, provienen principalmente de canteras, así como la arena y la grava no consolidada de origen natural [21, 22]. Según varios estudios, las propiedades de los agregados, tales como su forma, textura y tamaño de partícula, influyen en la trabajabilidad, facilidad de acabado, sangrado, bombeabilidad y segregación del concreto fresco, además de afectar su resistencia, contracción, densidad y durabilidad cuando se encuentra endurecido [23, 24, 25].

La relación entre el agua y el cemento es crucial en la formulación de mezclas de concreto, ya que tiene un impacto directo sobre las características de la mezcla fresca y las del concreto endurecido [26]. El cemento desempeña un rol esencial en la composición del concreto, y según Chattopadhyay [27], el cemento Portland es utilizado a nivel mundial en la fabricación de elementos estructurales y no estructurales en una amplia variedad de construcciones, tales como edificios, puentes, carreteras, pistas de aterrizaje, aceras y represas.

Las propiedades mecánicas del concreto son vitales para el diseño de estructuras y la evaluación de su rendimiento y capacidad de carga. Entre las propiedades más importantes se encuentran la resistencia a la compresión, la tracción por hendidura, la flexión y el módulo de elasticidad, que son determinantes para asegurar la estabilidad y durabilidad de las construcciones [28].

II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

La metodología seguida para esta investigación consistió en una revisión sistemática de la literatura, centrada en estudios recientes sobre las características físicas y químicas de las cenizas volantes y la microsílíce, así como sus efectos en las propiedades mecánicas y el beneficio medioambiental en la industria de la construcción. Se incluyeron artículos publicados entre 2020 y 2024, que abordan palabras clave como: physical and chemical characteristics of fly ashes, mechanical properties of concrete incorporating microsilica, modulus of elasticity of concrete incorporating fly ashes, y environmental benefit of fly ash in the construction industry, entre otras.

Se consultaron bases de datos como SCOPUS y ScienceDirect para la obtención de artículos revisados por pares. En total, se seleccionaron 46 artículos que cumplieran con los criterios de inclusión establecidos, basados en la relevancia, calidad y claridad de la investigación. Los artículos fueron analizados exhaustivamente, enfocándose en los métodos utilizados, los resultados obtenidos y las conclusiones extraídas. La información recopilada fue sintetizada para ofrecer una visión global de los avances recientes en el uso de estos materiales en la mejora de las propiedades mecánicas del concreto, destacando también los beneficios ambientales asociados con su incorporación en la construcción.

III. RESULTADOS

OE1: Revisar las características de las cenizas volantes y microsílíce

Las partículas de las cenizas volantes (FA, por sus siglas en inglés) son extremadamente finas y, en su mayoría, presentan una forma esférica con diámetros variables. Dado que las FA se generan por la combustión de carbones provenientes de diversas fuentes, sus características físicas y químicas varían considerablemente. Sin embargo, la mayoría de las FA disponibles tiene una naturaleza puzolánica. La composición de fases de calcio y aluminosilicato amorfo en las FA depende del tipo de carbón utilizado. En este sentido, la cantidad de estas fases varía significativamente [29]. Además, según Feng et al. [30], señalan que las partículas con una densidad aparente superior a 2.5 gr/cm^{-3} contienen menos fase vítrea y están compuestas principalmente por minerales cristalinos como mullita, cuarzo, hematita, cal y grafito.

En cuanto a la microsílíce, Bajaber y Hakeem [31], indican que este material es un subproducto derivado del humo del horno en la producción de aleaciones de silicio metálico y ferrosilicio. Las partículas de microsílíce, que son predominantemente redondeadas, tienen un diámetro promedio de $0,15 \mu\text{m}$, y la mayoría de ellas presentan tamaños inferiores a $1 \mu\text{m}$. Este material tiene un potencial considerable en diversas aplicaciones, debido a sus características particulares, como su tamaño de partícula extremadamente pequeño y su alta reactividad química, lo que lo convierte en un aditivo valioso en la mejora de las propiedades de materiales como el concreto.

OE2: Revisar las características del concreto incorporando cenizas volantes y microsílíce.

Para satisfacer las necesidades de los objetivos de desarrollo sostenible se debe realizar una evaluación detallada del uso del concreto elaborado con desechos industriales para un enfoque práctico y confiable. En este sentido, Wang et al. [32], obtuvieron que una relación de masa de ceniza volante a ganga de carbón de 40/60 resultó en una mejora del 9.6% en la resistencia a la compresión respecto a la muestra

patrón; ahora bien, Fang et al. [33], señalan que 10% de CV condujo a una mejora significativa en la resistencia a la compresión, incrementando un 8% con respecto al concreto patrón; mientras que, Venkata et al. [34], mostraron que el 25% de CV permitió incrementar la resistencia a compresión en un 12.11% respecto a la mezcla de concreto convencional.

Con referencia a la resistencia a flexión, Fang et al. [33], indicaron que la incorporación de un 10% de CV condujo a una mejora significativa en la resistencia a flexión aumentándola en un 10% respecto al concreto patrón; asimismo, Ali et al. [35], informaron que proporciones mayores al 20% de CV, resultó en un aumento del 20% en la resistencia a la flexión en comparación con la muestra de control; corroborándose en el estudio de Venkata et al. [34], quienes indicaron que proporciones del 25% de CV permitió incrementar la resistencia a flexión en un 29.67% respecto a la mezcla de concreto convencional.

Para la resistencia a tracción, Koushkbaghi et al. [36], determinaron que el 10% de cenizas volantes mejoró significativamente la resistencia a la tracción del concreto, con aumentos del 34.6% en comparación con la muestra de control; mientras que, Ali et al. [35], mostraron que el 20% de CV, provocó un aumento del 16.67% en la resistencia a tracción en comparación con la muestra de control; a su vez; Venkata et al. [34], informaron que el 25% de CV permitió incrementar la resistencia a tracción del concreto en un 23.07% respecto a la mezcla de concreto convencional; por otro lado, El-Hassan & Elkholy [37], encontraron que la incorporación de CV, aumentó la resistencia a la tracción en un 17% en comparación con la mezcla simple

Referente al módulo elástico, El-Hassan & Elkholy [37], mostraron que la incorporación de cenizas volantes mejoró el módulo de elasticidad del concreto en un 12% en comparación con la mezcla simple. No obstante, Reddy et al. [38], en su estudio indicaron que, el 8% de cenizas volantes redujo entre un 15 y un 28% respecto a la muestra inicial.

En cuanto a la incorporación del microsílíce, Akarsh et al. [39], reflejaron que el

uso del 7% de humo de sílice incrementó la resistencia a compresión del concreto en un 29.5% en comparación con el concreto de referencia; no obstante, Liu et al. [22], observaron que la resistencia a la compresión disminuyó en un 18.4% al utilizar un 10% de humo de sílice como reemplazo del cemento en la mezcla; por su parte, Ali et al. [40], informaron que el uso de 20% de SF en la producción de concreto mostró una disminución del 4% en la resistencia a la compresión en comparación con la muestra de referencia; además, Habibi et al. [26], mostraron que el uso de SF al 5 y al 10% aumenta la resistencia a la compresión en un 3.5 y un 7%, respectivamente, con referencia al concreto patrón. En efecto, el uso de una pequeña cantidad de SF tiene un papel principal en el aumento de la resistencia a la compresión del concreto, mientras que el uso de un mayor contenido de SF conduce a una reducción de la resistencia a un valor inferior al de la muestra de concreto control.

Con referencia a la resistencia a flexión, Nasir et al. [41], reflejaron que la utilización de una dosis de 0.75% de microsílíce produce una mejora del 72 % en la resistencia a la flexión respecto a la muestra inicial; al mismo tiempo, İhsan et al. [42], mostraron que, la incorporación de un 5% de microsílíce resultó en mejoras notables en la resistencia a flexión en un 7.45% respecto a la muestra base; mientras que, Chen et al. [27], observaron que el concreto que contenía un 7% de SF aumentó un 8.48% la resistencia en comparación con la de la muestra de concreto control; por otro lado, Abu et al. [43], informaron que al incorporar el 15% de microsílíce mejoró la resistencia en un 13.33% respecto a la muestra con 10% de microsílíce.

Para la resistencia a tracción, Nasir et al. [41], reportaron que, dosis del 0.75% de microsílíce produce una mejora del 93% en la resistencia a la tracción respecto a la muestra base; asimismo, İhsan et al. [42], evidenciaron que, la incorporación de un 5% de microsílíce resultó en mejoras notables en la resistencia a tracción, con aumentos del 6.18% en base a la muestra inicial; no obstante, Abu et al. [43], señalaron que, la resistencia máxima de 17 MPa se logra cuando el volumen de microsílíce es del 25%. Entre tanto, Alani et al. [28], confirmaron que el uso de 20% de microsílíce como

reemplazo del cemento aumentó la resistencia del concreto en un 59.15% respecto al concreto patrón.

Con referencia al módulo elástico, Abu et al. [43], informan que el 5% de microsilíce origina una reducción del 22% en la elasticidad del concreto en base a la muestra inicial; por otro lado, Tayeh et al. [44], en su estudio encontraron que, el módulo elástico se redujo a un valor mínimo cuando se utilizó un 15% de microsilíce y luego aumentaron significativamente cuando se utilizó más del 15 % de microsilíce.

OE3: Revisar el beneficio medioambiental de las cenizas volantes y microsilíce

Reducir el impacto ambiental del concreto es un objetivo crucial para minimizar los efectos negativos a largo plazo en la construcción [45]. Desde esta perspectiva, Farmani et al. [46], señalan que, reemplazar una parte del cemento con microsilíce como subproducto industrial- tiene múltiples beneficios ecológicos: proteger el medio ambiente a través de la reutilización de residuos, reducir la demanda de energía y recursos naturales , disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, reducir los costos de fabricación del cemento y, finalmente, mejorar el rendimiento de la precipitación microbiana de carbonato conduce a la producción de hormigón más sostenible.

Por otra parte, la utilización de productos de desecho como sustitutos parciales del cemento, como las cenizas volantes es una estrategia para mejorar la sostenibilidad del concreto. La eliminación de estos subproductos en vertederos y lugares cercanos afecta a la salud humana y ambiental; por ende, la reutilización de estos materiales mejora la sostenibilidad de su producción [20]. Asimismo, las cenizas volantes son un componente esencial de la construcción sostenible, ya que cumplen con los criterios de ASTM, LEED y el código de construcción [47].

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

4.1. Discusión

OE1: Revisar las características de las cenizas volantes y microsílíce

Las características físicas y químicas de las cenizas volantes dependen del tipo de carbón utilizado, lo que provoca variaciones en su contenido de calcio y aluminosilicato amorfo. Según Feng et al. [30], las partículas de FA con densidad superior a $2,5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ tienen menos fase vítrea y están compuestas por minerales cristalinos como mullita, cuarzo y grafito. Esta variabilidad influye en su eficacia como aditivos en la mejora de propiedades del concreto.

Por otro lado, el microsílíce, posee partículas con un diámetro promedio de $0,15 \mu\text{m}$, son extremadamente pequeñas y tienen una alta reactividad química, lo que las convierte en un excelente aditivo para mejorar las propiedades del concreto [31]. A pesar de que su uso excesivo puede reducir algunas propiedades mecánicas, su incorporación en dosis moderadas muestra mejoras notables en la resistencia a compresión, flexión y tracción, además de ser un material reciclado que contribuye a la sostenibilidad ambiental del concreto.

OE2: Revisar las características del concreto incorporando cenizas volantes y microsílíce.

El uso de cenizas volantes en la mezcla de concreto ha demostrado mejorar significativamente sus propiedades mecánicas. Según Wang et al. [32], una mezcla con un 40/60 de ceniza volante y ganga de carbón incrementó la resistencia a la compresión en un 9,6%. En estudios de Fang et al. [33] y Venkata et al. [34], se observó que la adición de cenizas volantes entre un 10% y un 25% mejora la resistencia a la compresión, flexión y tracción del concreto en un rango de 8% a 12%. Además, referente a la elasticidad del concreto, El-Hassan & Elkholy [37], reflejaron que las cenizas volantes aumentaron el módulo elástico del concreto en un 12% en comparación con la mezcla simple. Estos resultados evidencian el potencial de las cenizas volantes para

optimizar las propiedades del concreto, reduciendo la necesidad de materiales más costosos y energéticamente intensivos.

En cuanto al microsílíce, sus efectos sobre la resistencia a compresión varían según la cantidad incorporada. Akarsh et al. [39], demostraron que el uso del 7% de microsílíce incrementó la resistencia a la compresión en un 29,5%, mientras que dosis más altas, como el 10% o 20%, pueden disminuirla, como señalaron Liu et al. [22], y Ali et al. [40]. Sin embargo, estudios sobre la resistencia a flexión y tracción han mostrado que dosis menores de microsílíce, como el 0,75% o 5%, pueden mejorar significativamente estas propiedades; por otro lado, Abu et al. [43], informan que el 5% de microsílíce origina una reducción del 22% en la elasticidad del concreto en base a la muestra inicial. Este comportamiento sugiere que, aunque la microsílíce tiene un gran potencial para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, su dosis debe ser cuidadosamente controlada para maximizar sus beneficios.

OE3: Revisar el beneficio medioambiental de las cenizas volantes y microsílíce

El uso de cenizas volantes y microsílíce como sustitutos parciales del cemento presenta beneficios medioambientales significativos. Farmani et al. [46], destacan que la incorporación de microsílíce reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, la demanda de energía y la explotación de recursos naturales, contribuyendo a la sostenibilidad del concreto. Además, la reutilización de estos residuos industriales como aditivos no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también mejora el rendimiento del concreto, lo que lo convierte en una opción más ecológica y económica. Asimismo, la utilización de cenizas volantes como sustituto del cemento contribuye a la reducción de la acumulación de estos desechos en vertederos, que de otro modo podrían tener efectos negativos en la salud y el medio ambiente [47].

4.2. Conclusión

Las cenizas volantes y microsílíce son materiales de gran potencial para mejorar las propiedades del concreto, siendo las primeras principalmente puzolánicas y las segundas con una alta reactividad debido a su tamaño de partícula extremadamente pequeño. La variabilidad en las características de las FA depende del origen del carbón utilizado, lo que afecta su eficacia como aditivo. En cuanto al microsílíce, su pequeño tamaño y su alta reactividad química permiten que mejore significativamente propiedades del concreto, especialmente cuando se utiliza en dosis controladas. Ambos materiales contribuyen a una construcción más sostenible al utilizar desechos industriales reciclados.

El concreto que incorpora cenizas volantes muestra mejoras notables en propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, flexión y tracción, con incrementos significativos en función de la cantidad utilizada. Las cenizas volantes en concentraciones de hasta el 25% proporcionan un aumento en la resistencia, destacándose por su capacidad para mejorar la sostenibilidad del concreto. En cuanto al microsílíce, pequeñas cantidades como el 7% mejoran la resistencia a compresión, pero cantidades superiores pueden disminuirla, lo que sugiere que su uso debe ser cuidadosamente optimizado. Ambos materiales ofrecen ventajas en la mejora del desempeño del concreto, dependiendo de las dosis empleadas.

La utilización de cenizas volantes y microsílíce en el concreto ofrece beneficios medioambientales sustanciales, ya que permite la reutilización de residuos industriales y la reducción de la huella de carbono en la construcción. Estos materiales contribuyen a disminuir la demanda de recursos naturales y la emisión de gases de efecto invernadero, favoreciendo la sostenibilidad. La integración de estos aditivos en la producción de concreto no solo mejora sus propiedades mecánicas, sino que también promueve prácticas constructivas más responsables con el medio ambiente, alineadas con los objetivos globales de sostenibilidad.

REFERENCIAS

- [1] A. Unni and G. Anjali, "Cost-benefit analysis of conventional and modern building materials for sustainable development of social housing," *Materials Today: Proceedings*, vol. 51, no. Part 3, pp. 1649-1657, 2022.
- [2] A. Tripathy and P. Kumar, "Ecological impact assessment of sustainable concrete paver blocks based on endpoint damage categories," *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [3] K. Sarica, G. Harputlugil, G. İnaner and E. Kollugil, "Building sector emission reduction assessment from a developing European economy: a bottom-up modelling approach.," *Energy Policy*, vol. 174, p. 113429, 2023.
- [4] H. Pervez, Y. Ali and A. Petrillo, "A quantitative assessment of greenhouse gas (GHG) emissions from conventional and modular construction: a case of developing country.," *Journal of Cleaner Production*, vol. 294, p. 126210, 2021.
- [5] A. Estokova and M. Fabianova, "Environmental impacts of materials in masonry residential house," *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 2024.
- [6] F. Althoey, W. Sammer, M. Sufian and A. Farouk, "Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment," *Developments in the Built Environment*, vol. 16, p. 100284, 2023.
- [7] L. Muneron, A. Hammad and M. Najjar, "Comparison of the environmental performance of ceramic brick and concrete blocks in the vertical seals' subsystem in residential buildings using life cycle assessment," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 5, p. 100243, 2021.
- [8] K. Shelote, A. Bala and S. Gupta, "An overview of mechanical, permeability, and thermal properties of silica fume concrete using bibliographic survey and building information modelling," *Construction and Building Materials*, vol. 385, p. 131489,

2023.

- [9] M. Nadeem, M. Jameel, Z. Ibrahim and M. Bunnori, "Incorporation of recycled aggregates and silica fume in concrete: an environmental savior-a systematic review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 20, pp. 4525-4544, 2022.
- [10] M. Zawrah, A. Wassel, R. Youness and M. Taha, "Recycling of aluminum dross and silica fume wastes for production of mullite-containing ceramics: Powder preparation, sinterability and properties," *Ceramics International*, vol. 48, no. 21, pp. 31661-31671, 2022.
- [11] R. Khattab, H. Sadek, M. Taha and A. EL-Rafei, "Recycling of silica fume waste in the manufacture of β -eucryptite ceramics," *Materials Characterization*, vol. 71, p. 110740, 2021.
- [12] R. Ahmed and N. Ugur, "Effects of Silica Fume and Micro Silica on the Properties of Mortars Containing Waste PVC Plastic Fibers," *Microplastics*, vol. 1, no. 4, pp. 587-609, 2022.
- [13] A. Singh and N. Singh, "Mechanical properties of silica fume based concrete: A review," *Materials Today: Proceedings*, 2024.
- [14] Y. Mao, D. Jiao, X. Hu, Z. Jiang and C. Shi, "Effect of dispersion behavior of silica fume on the rheological properties and early hydration characteristics of ultra-high strength mortar," *Cement and Concrete Composites*, vol. 152, p. 105654, 2024.
- [15] G. Bhagath and V. Durga, "Environmental impact of concrete containing high volume fly ash and ground granulated blast furnace slag," *Journal of Cleaner Production*, vol. 448, p. 141729, 2024.
- [16] D. Kumar, P. Abhilash, R. Singh, R. Kumar and V. Kumar, "Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies," *Cleaner Materials*, vol. 6, p. 100143, 2022.

- [17] L. Assi, K. Carter, E. Deaver and P. Ziehl, "Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 263, p. 121477, 2020.
- [18] Z. Liu, K. Takasu, H. Koyamada and H. Suyama, "A study on engineering properties and environmental impact of sustainable concrete with fly ash or GGBS," *Construction and Building Materials*, vol. 316, p. 125776, 2022.
- [19] S. Fernando, C. Gunasekara, D. Law, M. Nasvi, S. Setunge, R. Dissanayake and D. Robert, "Environmental evaluation and economic analysis of fly ash-rice husk ash blended alkali-activated bricks," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 95, p. 106784, 2022.
- [20] C. Orozco, S. Babel, S. Tangtermsirikul and T. Sugiyama, "Understanding the environmental, economic, and social impact of fly ash utilization on early-age high-strength mass concrete using life cycle analysis," *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [21] J. Nilimaa, "Smart materials and technologies for sustainable concrete construction," *Developments in the Built Environment*, vol. 15, p. 100177, 2023.
- [22] E. Fanijo and J. Temitope, "A comprehensive review on the use of recycled concrete aggregate for pavement construction: Properties, performance, and sustainability," *Cleaner Materials*, vol. 9, p. 100199, 2023.
- [23] N. Mohanta and M. Murmu, "Alternative coarse aggregate for sustainable and eco-friendly concrete - A review," *Journal of Building Engineering*, vol. 59, p. 105079, 2022.
- [24] R. Mambeli, "Municipal solid waste ash," *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources*, pp. 93-177, 2022.
- [25] J. Tiegoum, L. Mambou and E. Assoua, "Physical, mechanical properties and microstructure of concretes made with natural and crushed aggregates: Application

- in building construction," *Cleaner Materials*, vol. 7, p. 100173, 2023.
- [26] P. Senthil and P. Yaashikaa, "Water," *Water in Textiles and Fashion*, pp. 1-20, 2019.
- [27] B. Chattopadhyay, "Genetically-enriched microbe-facilitated self-healing nano-concrete," *Smart Nanoconcretes and Cement-Based Materials*, pp. 461-483, 2020.
- [28] F. Kassimi and K. Khayat, "Mechanical properties of fiber-reinforced concrete with adapted rheology," *Cement and Concrete Composites*, vol. 118, p. 103958, 2021.
- [29] T. Hemalatha and A. Ramaswamy, "Fly ash cement," *Handbook of Fly Ash*, pp. 547-563, 2022.
- [30] S. Feng, X. Zhang and L. Xu, "Correlation analysis of various characteristics of fly ash based on particle separation," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 2020, p. e02785, 2024.
- [31] M. Bajaber and I. Hakeem, "UHPC evolution, development, and utilization in construction: a review," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 10, pp. 1058-1074, 2021.
- [32] Y. Wang, Y. Tan, Y. Wang and C. Liu, "Mechanical properties and chloride permeability of green concrete mixed with fly ash and coal gangue," *Construction and Building Materials*, vol. 233, p. 117166, 2020.
- [33] Z. Fang, Y. Luo, H. Chen, Y. Gao, W. Yang and C. Wang, "Research on mechanical properties and hydration characteristics of ultra-high performance concrete with high-volume fly ash microsphere," *Journal of Building Engineering*, vol. 78, p. 107738, 2023.
- [34] B. Venkata, G. Jawahar y C. Sashidhar, «Effectiveness of alccofine and fly ash on mechanical properties of ternary blended self compacting concrete,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 33, n° Part 1, pp. 73-79, 2020.
- [35] B. Ali, L. Ali Qureshi, S. H. Ali Shah, S. Ur Rehman, I. Hussain and M. Iqbal, "A

step towards durable, ductile and sustainable concrete: Simultaneous incorporation of recycled aggregates, glass fiber and fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 251, p. 118980, 2020.

[36] M. Koushkbaghi, M. Jafar Kazemi, H. Mosavi and E. Mohseni , "Acid resistance and durability properties of steel fiber-reinforced concrete incorporating rice husk ash and recycled aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 202, pp. 266-275, 2019.

[37] H. El-Hassan and S. Elkholy, "Enhancing the performance of Alkali-Activated Slag-Fly ash blended concrete through hybrid steel fiber reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 331, no. 125313, 2021.

[38] R. Reddy, K. Muniraj and R. Chand, "Investigation on modulus of elasticity of fly ash-ground granulated blast furnace slag blended geopolymer concrete," *Materials Today: Proceedings*, vol. 27, no. Part 2, pp. 718-723, 2020.

[39] P. Akarsh, S. Marathe and A. Bhat, "Influence of graphene oxide on properties of concrete in the presence of silica fumes and M-sand," *Construction and Building Materials*, vol. 268, p. 121093, 2021.

[40] K. Ali, M. Qureshi, S. Saleem and S. Khan, "Effect of waste electronic plastic and silica fume on mechanical properties and thermal performance of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 285, p. 122952, 2021.

[41] S. Nasir, M. Irshad and M. Alkharisi, "Combined effect of silica fume and various fibers on fresh and hardened properties of concrete incorporating HDPE aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 445, p. 137940, 2024.

[42] A. İhsan, Y. Onuralp, A. Bahrami and I. Hakeem, "Mechanical performance of geopolymer concrete with micro silica fume and waste steel lathe scraps," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02548, 2023.

[43] Y. Abu, D. Sulaiman and M. Akeed, "Influence of steel fibers and microsilica on the

mechanical properties of ultra-high-performance geopolymer concrete (UHP-GPC)," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01245, 2022.

[44] B. Tayeh, M. Akeed, S. Qaidi and B. Bakar, "Influence of microsilica and polypropylene fibers on the fresh and mechanical properties of ultra-high performance geopolymer concrete (UHP-GPC)," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01367, 2022.

[45] A. Mustafa and B. Tayeh, "Metakaolin in ultra-high-performance concrete: A critical review of its effectiveness as a green and sustainable admixture," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 21, p. e03967, 2024.

[46] F. Farmani, P. Khadiv and A. Akbar, "Dual eco-friendly application of silica fume and scoria in cement-based materials through the enhancement of microbially-induced carbonate precipitation," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, p. e01481, 2022.

[47] B. Kant, A. Gupta and S. Gowda, "Constructing a greener future: A comprehensive review on the sustainable use of fly ash in the construction industry and beyond," *Materials Today: Proceedings*, vol. 93, no. Part 3, pp. 257-264, 2023.