

ARTÍCULO DE REVISIÓN**Resistencia y beneficios ambientales de cenizas agrícolas y fibras naturales en el concreto****Strength and environmental benefits of agricultural ashes and natural fibers in concrete**Yessenia Rosales¹ * y Manuel Laurencio¹ **RESUMEN**

Este artículo analiza el uso de residuos agrícolas y fibras naturales como materiales alternativos en la producción de concreto con el objetivo de reducir el consumo de cemento y el impacto ambiental. Se realizó una revisión sistemática de estudios publicados entre 2017 y 2025, en inglés y español, obtenidos de la base de datos Scopus y enfocados en las áreas de ingeniería y tecnología de materiales. Los residuos agrícolas, como la ceniza de cáscara de arroz con más del 70 % de óxidos puzolánicos, permiten reemplazar hasta el 20 % del cemento y mejorar la resistencia a la compresión en un 30 %. Por otro lado, las fibras naturales como la celulosa, kenaf y aguja de pino rojo incrementan la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto. En particular, la adición de 0,5 % de fibra de celulosa reduce la penetración de agua en un 24 %, la permeabilidad en un 42 % y el ancho de grietas en un 85 %. Estos resultados evidencian que el uso de materiales de origen natural no solo mejora el desempeño del concreto, sino que a su vez contribuye a una construcción más sostenible.

Palabras clave: Cenizas agrícolas; fibras naturales; propiedades del concreto; sustitución de cemento; fibras de celulosa.

ABSTRACT

This article analyzes the use of agricultural waste and natural fibers as alternative materials in concrete production, with the aim of reducing cement consumption and environmental impact. A systematic review was conducted of studies published between 2017 and 2025, in English and Spanish, obtained from the Scopus database and focused on the areas of materials engineering and technology. Agricultural waste, such as rice husk ash with over 70% pozzolanic oxides, can replace up to 20% of cement and improve compressive strength by 30%. Furthermore, natural fibers, such as cellulose, kenaf, and red pine needle, increase the mechanical strength and durability of concrete. In particular, the addition of 0.5% cellulose fiber reduces water penetration by 24%, permeability by 42%, and crack width by 85%. These results show that the use of natural materials not only improves concrete performance but also contributes to more sustainable construction.

Keywords: Agricultural ash; natural fibers; concrete of properties; cement replacement; cellulose fibers.

* Autor para correspondencia

¹ Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú. Email: 2019100615@ucss.pe, mlaurencio@ucss.edu.pe

INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción enfrenta desafíos significativos debido al elevado consumo de recursos naturales no renovables, la alta demanda energética y su impacto ambiental (Abdalla et al., 2023). El concreto, ampliamente utilizado en la construcción por sus propiedades de resistencia, depende de estos recursos, lo que podría llevar a su escasez (Gouda et al., 2023). Este incremento en la utilización de materiales convencionales se atribuye al crecimiento económico y al consecuente aumento del nivel de vida. Además, la producción de cemento y agregados genera grandes emisiones de CO₂ debido al uso de electricidad, combustibles y explosivos durante su procesamiento y transporte (Kareem et al., 2022).

El uso de materiales alternativos puede contribuir a mitigar estos impactos, reduciendo el agotamiento de los recursos naturales y la contaminación ambiental. Una opción viable es la incorporación de fibras naturales y residuos agrícolas, los cuales han demostrado su potencial para disminuir las emisiones de carbono y mejorar la sostenibilidad del concreto (Padavala et al., 2024; Bhutto et al., 2024). La incorporación de estos residuos no solo permite una gestión eficiente de los desechos agrícolas, sino que también en una estrategia efectiva que protege el medio ambiente (Ahmad et al., 2023).

En países con fuerte actividad agrícola, como India, los residuos agrícolas representan más del 58% del Producto Bruto Interno (PBI) y contribuyen con aproximadamente con el 16% del PBI nacional. Investigaciones indican que los residuos agrícolas, cuando son procesados adecuadamente, poseen propiedades puzolánicas que los hacen idóneos para sustituir parcialmente el cemento en la producción de concreto, mejorando su resistencia y durabilidad (Ahsan y Hossain, 2018). Se estima que esta práctica podría reducir el consumo mundial de cemento en aproximadamente 121 millones de toneladas anuales (Gudainiyan y Kishore, 2023). Estos residuos, ricos en SiO₂, han demostrado mejorar las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto cuando se incorporan de manera adecuada (Roselló et al., 2017). Por otro lado, el concreto reforzado con fibras es altamente valorado en la construcción debido a su alto rendimiento mecánico y su durabilidad. La adición de fibras es una estrategia eficaz para mejorar las propiedades del concreto, reduciendo su impacto ambiental y sus costos en comparación con otros métodos de refuerzo (Rajkohila et al., 2024). Esta práctica ha sido ampliamente aplicada en infraestructuras civiles, donde el concreto reforzado con fibras ha demostrado ser una opción confiable (Meng et al., 2020). Sin embargo, la variabilidad en la composición y estructura de las fibras afecta su desempeño en el concreto, por lo que es fundamental seleccionar el tipo adecuado según la aplicación específica. Estas fibras naturales presentan un alto potencial como materiales de construcción sostenibles, lo que subraya la importancia de su caracterización y evaluación (Basu et al., 2023).

Entre las fibras naturales utilizadas, destaca la fibra de celulosa, una materia orgánica ampliamente distribuido en la naturaleza. Para mejorar su desempeño en el concreto, estas fibras requieren un

pretratamiento químico que elimine compuestos como la lignina, lo que permite una mayor durabilidad y compatibilidad con la matriz cementosa (Hasan et al., 2023). La fibra de celulosa presenta ventajas como su bajo costo de procesamiento, capacidad de reciclaje y su ausencia de toxicidad. Su incorporación en el concreto contribuye a la transferencia de tensiones y retrasa la propagación de grietas. Estudios han demostrado que la estructura en red que forma la fibra en la pasta de cemento mejora la viscosidad de la matriz, lo que incrementa la resistencia a la flexión y ductilidad del concreto. Además, la fibra de celulosa puede optimizar el proceso de curado interno, favoreciendo la hidratación del cemento y mejorando las propiedades mecánicas del material (Wei et al., 2021).

A pesar del creciente interés en el uso de residuos agrícolas y fibras naturales en el concreto, aún existen incertidumbres sobre su impacto combinado en propiedades clave como resistencia y durabilidad. La variabilidad en los tratamientos y la falta de estandarización en su procesamiento dificultan la comparación de resultados entre estudios. Por ello, es fundamental una revisión integral que analice los avances recientes y evalúe su aplicabilidad en la construcción.

Esta revisión tiene como objetivo evaluar la viabilidad de estos materiales alternativos en la producción de concreto. Se analizarán estudios previos y casos de éxito, comparando el impacto de distintos residuos agrícolas como sustitutos parciales del cemento. Entre ellos se incluyen la ceniza de cáscara de arroz (RHA), la paja de trigo (WSA), el bagazo de caña de azúcar (SBA), la ceniza de tallo de maíz (CTM) y la ceniza de hojas de bambú (BLA), así como la adición de fibras de bambú, paja de maíz, aguja de pino rojo y fibras de celulosa. Se prestará especial atención a la influencia en la resistencia a la compresión y a la flexión del concreto, con el fin de proporcionar una visión crítica sobre su potencial en la industria de la construcción.

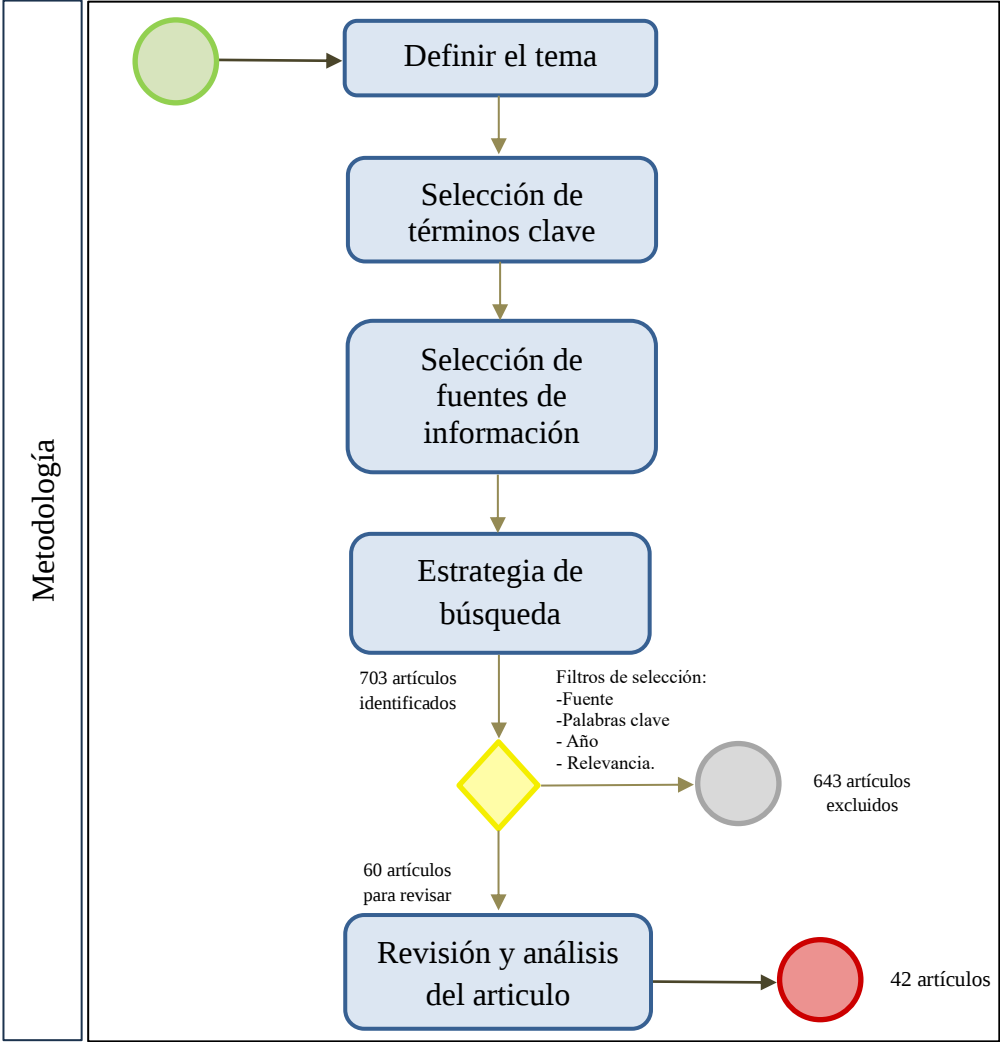
MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó mediante una revisión sistemática de la literatura científica enfocada en el uso de residuos agrícolas y fibras naturales en la elaboración de concreto. El estudio se llevó a cabo en el ámbito de la Ingeniería civil y la Tecnología Materiales, abarcando publicaciones comprendidas entre los años 2017 y 2025. Para la búsqueda y recopilación de información, se emplearon bases de datos académicas, principalmente Scopus, utilizando términos clave como: “properties of concrete”, “agricultural ash”, “natural fibers”, “cellulose fibers” and “cement replacement”. Los criterios de selección incluyeron la relevancia temática, la calidad metodológica de los estudios, y la publicación en idiomas inglés o español. Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se identificaron 60 artículos, de los cuales se seleccionaron 42 para un análisis más detallado. Estos estudios abordaron aspectos como la composición química de los residuos agrícolas, los porcentajes de sustitución del cemento, y el impacto

de las fibras naturales en la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto. Los datos recopilados fueron organizados en categorías clave, evaluando la influencia de estos materiales en las propiedades del concreto. Esto permitió construir un panorama integral sobre los avances en el uso de alternativas sostenibles y renovables en la construcción, resaltando su potencial para mejorar la eficiencia y reducir el impacto ambiental de los materiales convencionales.

Figura 1

Diagrama de flujo de la metodología para una revisión literaria



Nota. El gráfico resume la metodología adoptada para el desarrollo de este artículo de revisión.

Residuos Agrícolas

Se presenta una tabla que resume los parámetros clave de estos materiales en comparación con el cemento, considerando su gravedad específica, color y tamaño de partícula. Esta información es esencial para entender cómo estas características físicas influyen en las propiedades y el rendimiento del concreto.

Tabla 1

Características físicas del cemento y diversos residuos agrícolas

Autor	Parámetro			
	Residuos agrícolas	Gravedad específica	Color	Tamaño de partícula
(Maglad et al., 2023)	Cemento	3.15	Gris	22.5-28 μm
(Ramakrishna y Gopi, 2023)	Ceniza de cáscara de arroz	1.375	Gris	25 μm
(Bheel, et al., 2024a)	Cenizas de paja de trigo	2.21	Gris	75 μm
(Maglad et al., 2023)	Cenizas de bagazo de caña de azúcar	2.38	Negro	75 μm
(Jha et al., 2021)	Cenizas de bagazo de caña de azúcar	2.16	Negro	75 μm
(Salem et al., 2022)	Ceniza de tallo de maíz	2.15	Gris claro	75 μm
(Gavioli et al., 2024)	Ceniza de hoja de bambú	2.62	Gris	14.59 μm

Nota. Los residuos agrícolas, debido a su color gris, similar al cemento, mejoran la uniformidad visual del concreto. Su alta gravedad específica y finura contribuyen en aumentar la densidad, resistencia, y a funcionar como sustitutos eficientes del cemento.

Composición Química

La tabla 2 muestra la composición química de los residuos agrícolas en comparación con el cemento, destacando que su contenido en dióxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) es superior al 70%, lo cual los clasifica como puzolanas de alta calidad de acuerdo con las normas ASTM C 618-08 y NTP 334.104. Los elevados niveles de silicio en los residuos agrícolas les otorgan propiedades puzolánicas, lo que contribuye a mejorar la adhesión y la resistencia mecánica del concreto, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 2

Composición química del cemento y diversos residuos agrícolas

Autores	Residuos Agrícolas	Silicio (SiO_2)	Cal (CaO)	Aluminio (Al_2O_3)	Óxido de hierro (Fe_2O_3)	Magnesio (MgO)	Trióxido de azufre (SO_3)	Oxido de sodio (Na_2O)	Oxido de potasio (K_2O)
(Maglad et al., 2023)	Cemento	20	62.34	6.25	3.55	2.12	2.42	0.81	0.75
(Abellan-Garcia et al., 2023)	Ceniza de cáscara de arroz	88.59	0.74	0.31	0.21	0.66	0	0.21	2.46
(Zareei et al., 2017)	Ceniza de cáscara de arroz	86.73	0.39	0.04	0.61	0.08	1.32	9.76	0.01
(Bheel, et al., 2024b)	Cenizas de paja de trigo	67.34	10.6	6.44	4.36	0	1.85	0.47	0
(Maglad et al., 2023)	Cenizas de bagazo de caña de azúcar	75	7.5	3.9	2	2.6	0	0.4	3.1
(Salem et al., 2022)	Ceniza de tallo de maíz	52.3	5.4	16.29	2.42	3.7	0	0.5	6.2
(Nduka et al., 2022)	Ceniza de hoja de bambú	75.1	4.22	3.55	1.34	4.04	0	0	0

Nota. Los residuos agrícolas contienen un mayor contenido de silicio y menor de cal en comparación con el cemento. Esta diferencia en composición contribuye a su capacidad para mejorar la compatibilidad y la unión en el concreto.

Tabla 3

Propiedades mecánicas de residuos agrícolas

Autor	Residuo Agrícola (Material)	Proporción (%)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia a la flexión (Mpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)
(Ramakrishna y Gopi, 2023)	Ceniza de cáscara de arroz	20%	37.75	4.89	3.74
(Zareei et al., 2017)	Ceniza de cáscara de arroz	20%	93.28	—	6.52
(Bheel, et al., 2024a)	Cenizas de paja de trigo	10%	68.00	5.98	4.25
(Bheel, et al., 2024b)	Cenizas de paja de trigo	10%	33.00	5.16	3.55
(Salem et al., 2022)	Ceniza de tallo de maíz	10%	23.20	4.2	2.5
(Jha et al., 2021)	Cenizas de bagazo de caña de azúcar	10%	35.38	—	2.70

Nota. Las propiedades mecánicas de cada residuo agrícola varían según el tipo y la proporción utilizada. La finura y el contenido de silicio son factores que influyen para maximizar su contribución a la resistencia del concreto.

Fibras Naturales

Se expone una tabla que resume las propiedades mecánicas de diversos tipos de fibras naturales utilizadas en el concreto, resaltando el impacto de cada fibra en las propiedades mecánicas del material.

Tabla 4

Propiedades mecánicas de fibras naturales en el concreto

Autor	Nombre de la fibra	Longitud(mm)	Reemplazo (%)	Propiedades mecánicas		
				Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la Flexión (MPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)
(Ali et al., 2024)	Fibra de bambú	25.4	1	42.1	7.56	3.82
	Fibra de basalto	6	0.75			
(Jin et al., 2023)	Fibras de paja de maíz (CSF)	30-40	2	39.2	3	—
(Cogurcu, 2022)	Fibras de aguja de pino rojo	30	0.25 y 0.50	125.73 -129.47	21.95 - 22.46	—
(Singh & Gupta, 2020)	Fibra de celulosa	2.1	0.5	36.21	2.18	—
(Ma et al., 2020)	Fibra de celulosa (CFRC)	5-7	0.9	39.46	3.88	3.03
(Ja’e et al., 2023)	Fibra de kenaf	50	1.50	36.21	9.591	2.51

Nota. La tabla muestra como la incorporación de distintas fibras naturales mejora las propiedades mecánicas del concreto, especialmente en resistencia a la compresión y flexión.

Fibras de celulosa

La tabla 5 detalla una comparación de las propiedades mecánicas de diferentes tipos de fibras de celulosa. La variabilidad en longitud, diámetro y densidad impacta directamente en su comportamiento en el concreto. Estos factores son decisivos para maximizar su efecto, permitiendo mejorar su durabilidad, resistencia y capacidad de autocuración en aplicaciones específicas.

Tabla 5

Propiedades de fibras de celulosa

Autor	Tipo de FC	Proporción de FC en (%)	Proporción de FC en (Kg/m ³)	Longitud promedio	Diámetro promedio	Densidad	Resistencia a la tracción	Modulo Elástico
(Singh & Gupta, 2020a)	Ultra fibra 500	0.5	-	2.1 mm	16 µm	1.10 g/cm ³	750 Mpa	8.5 GPa
(Ma et al., 2020)	Fibra RS2000	-	0.9	5-7 mm	10-20 µm	1.1 g/cm ³	600-900 Mpa	8.5 GPa
	CTF 900	-	0.9, 1.2 y 1.5	2.1 mm	16 µm	1.109 g/cm ³	> 900 Mpa	> 8.5 Gpa
(Wu et al., 2024)	CTF850	-	0.9, 1.2 y 1.5	2.8 mm	19 µm	1.109 g/cm ³	> 850 Mpa	>8.0 Gpa
	CTF 800	-	0.9, 1.2 y 1.5	2.2 mm	16 µm	1.109 g/cm ³	>800 Mpa	>8.0 Gpa
(Xu et al., 2020)	CTF 960	-	1.0, 1.2, 1.5 y 1.8	2.1 mm	18 µm	1.109 g/cm ³	960 Mpa	8.5 GPa
(Singh & Gupta, 2020b)	Ultra fibra 500	0.5	-	2.1 mm	16 µm	1.10 g/cm ³	750 Mpa	8.5 GPa
(Igbokwe et al., 2024)	Ultra Fiber 500	0.45	-	2.1 mm	18 µm	1.1 g/cm ³	900 Mpa	-
(Gamage et al., 2024)	CTF 960	1.5	-	2.1mm	18 µm	1.10 g/cm ³	960 Mpa	8.5 GPa

Nota. La tabla detalla las propiedades físicas y mecánicas de las fibras de celulosa, destacando cómo su tipo y proporción influyen en el módulo elástico y la resistencia a la tracción.

RESULTADOS

Los hallazgos sugieren que estos materiales alternativos no solo mejoran significativamente las propiedades del concreto, sino que además representan una opción sostenible para la industria de la construcción.

Uso de Residuos Agrícolas

Se analizaron estudios que destacan el uso de cenizas derivadas de residuos agrícolas como adiciones puzolánicas al concreto. Entre los residuos evaluados se encuentran la ceniza de cáscara de arroz, paja de trigo, bagazo de caña de azúcar y tallo de maíz. Las cenizas presentan una proporción de óxidos (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃) superior al 70 %, cumpliendo con los criterios para ser considerados materiales puzolánicos.

En cuanto al desempeño mecánico, la ceniza de cascara de arroz sobresale por su alta resistencia a la compresión (93.28 MPa), lo que la posiciona como una de las más efectivas para mejorar la capacidad estructural del concreto. Además, su tamaño de partícula fina (25–75 µm) y color gris favorecen su integración en la mezcla sin alterar la estética del material. La ceniza de paja de trigo, si bien presenta una menor resistencia a la compresión (33–68 MPa), ofrece buenos resultados en resistencia a la flexión (5,98 MPa), lo cual es relevante en aplicaciones donde el concreto está sometido a esfuerzos combinados. Por otro lado, la ceniza de bagazo de caña de azúcar mostró propiedades mecánicas intermedias, con una

resistencia a la compresión de 35.38 MPa y la tracción de 2.7 MPa. No obstante, su color negro puede representar una limitación estética. A pesar de ello, su comportamiento mecánico sigue siendo aceptable. En contraste, la ceniza de tallo de maíz presentó los valores más bajos en los tres parámetros mecánicos (23.2 MPa a compresión, 4.2 MPa a flexión y 2.5 MPa a tracción), lo que podría limitar su uso como complemento parcial en mezclas.

En síntesis, aunque todos los residuos analizados presentan viabilidad como adiciones puzolánicas, existen diferencias significativas en su rendimiento. La ceniza de cáscara de arroz y la de paja de trigo se destacan como las más prometedoras, mientras que las cenizas de bagazo de caña y de tallo de maíz podrían requerir tratamientos adicionales para mejorar su reactividad y propiedades mecánicas.

Tabla 6

Comparación de propiedades físicas, químicas y mecánicas de residuos agrícolas utilizados como adiciones puzolánicas en concreto

Autor	Residuos agrícolas	Parámetros físicos			Composición química		Propiedades mecánicas		
		Gravedad específica	Color	Tamaño de partícula	Propiedades puzolánicas	Proporción (%)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia a la flexión (Mpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)
(Ramakrishna y Gopi, 2023)	Ceniza de cáscara de arroz	1.375	Gris	25 μ m	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$	20%	37.75	4.89	3.74
(Zareei et al., 2017)	Ceniza de cáscara de arroz	—	Gris	75 μ m	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$	20%	93.28	—	6.52
(Bheel, et al., 2024a)	Cenizas de paja de trigo	2.21	Gris	75 μ m	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$	10%	68	5.98	4.25
(Bheel, et al., 2024b)	Cenizas de paja de trigo	—	Gris	75 μ m	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$	10%	33	5.16	3.55
(Jha et al., 2021)	Cenizas de bagazo de caña de azúcar	2.16	Negro	75 μ m	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$	10%	35.38	—	2.7
(Salem et al., 2022)	Ceniza de tallo de maíz	—	Gris	75 μ m	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70 \%$	10%	23.2	4.2	2.5

Nota. Los residuos agrícolas analizados cumplen con las propiedades puzolánicas requeridas para su uso en materiales cementicios y destacan por sus propiedades mecánicas para aplicaciones en concreto.

Incorporación de Fibras Naturales

Fueron revisados estudios que analizan el uso de fibras naturales como refuerzo en concreto, incluyendo fibras de bambú, basalto, paja de maíz (CSF), aguja de pino rojo, kenaf y celulosa, las cuales presentan diferencias notables en longitud, dosificación y desempeño mecánico. En términos físicos, la longitud de estas fibras varía considerablemente, desde 2.1 mm hasta 50 mm, lo que influye directamente en la trabajabilidad de la mezcla y, en consecuencia, en las propiedades mecánicas del concreto endurecido.

Tabla 7

Propiedades físicas y mecánicas de fibras naturales

Autor	Nombre de la fibra	Longitud (mm)	Reemplazo (%)	Reemplazo (kg/m3)	Propiedades mecánicas		
					Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la Flexión (MPa)	Resistencia a la Tracción (MPa)
(Ali et al., 2024)	Fibra de bambú	25.4	1	-	42.1	7.56	3.82
(Jin et al., 2023)	Fibra de basalto	6	0.75	-			
(Cogurcu, 2022)	Fibras de paja de maíz (CSF)	30-40	2	-	39.2	3	-
(Ja'e et al., 2023)	Fibras de aguja de pino rojo	30	0.25 - 0.50	-	125.73 -129.47	21.95 - 22.46	-
(Singh & Gupta, 2020)	Fibra de kenaf	50	1.5	-	36.21	9.591	2.51
(Ma et al., 2020)	Fibra de celulosa	2.1	0.5		36.21	2.18	-
(Xu et al., 2020)	Fibra de celulosa (CFRC)	5-7	-	0.9	39.46	3.88	3.03
	CTF 960	2.1	-	1.5	63.8	-	4.52

Nota. La tabla presenta las propiedades físicas y mecánicas de diferentes fibras naturales, estudiadas por su potencial para mejorar las características del concreto y su desempeño en diversas aplicaciones.

DISCUSIÓN

Análisis comparativo de uso de Residuos Agrícolas

La utilización de residuos agrícolas, como la ceniza de cáscara de arroz (RHA), el bagazo de caña de azúcar (SBA), la paja de trigo (WSA), ha demostrado ser una alternativa eficaz para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, especialmente en términos de resistencia a la compresión, flexión y tracción. Según Ramakrishna y Gopi (2023), la incorporación de un 20 % de RHA puede incrementar la resistencia a la compresión en un 30 % en comparación con el concreto convencional. Este efecto se atribuye al alto contenido de sílice amorfa presente en la RHA, que favorece las reacciones puzolánicas ,mejorando la cohesión de la matriz y la resistencia del concreto (Mostafa et al., 2022).

Sin embargo, los resultados varían según el tipo de residuo, su método de procesamiento, la granulometría y la composición química del material. En el caso de la RHA, su obtención mediante combustión controlada entre 550 °C y 700 °C durante 6 horas permite alcanzar un contenido de silicio amorfa entre el 85 % y el 90 % ,lo que maximiza su reactividad puzolánica. En contraste, la combustión a cielo abierto a temperaturas inferiores a 500 °C suele ser incompleta, lo que se traduce en una mayor cantidad de carbono no quemado y una menor reactividad del material (Zareei et al., 2017).

De forma similar, residuos como la WSA, SBA, CTM y BLA han sido tratados mediante combustión controlada en rangos de temperatura entre 500 °C y 750 °C, incluyendo procesos de secado y lavado previos para eliminar impurezas orgánicas y mejorar su desempeño como materiales cementantes suplementarios. Entre ellos, la RHA destaca por ofrecer los mayores beneficios mecánicos debido a su elevada concentración de sílice reactiva. En cambio, otros residuos como la CTM muestran una mayor

variabilidad en sus resultados, atribuida a una pérdida por ignición del 9,1 %, indicativa de la presencia de carbono no quemado, lo que puede reducir la eficacia de la reacción puzolánica (Salem et al., 2022). Además, se ha observado que estos residuos presentan bajos contenidos de cal (CaO), lo cual puede mejorar la durabilidad del concreto frente a condiciones ambientales adversas.

Según las normas de la ASTM C618-08 y NTP 334.104, estos residuos pueden clasificarse como puzolanas de alta calidad si su actividad puzolánica supera el 70 %. Sin embargo, su variabilidad requiere una caracterización físico-química detallada para garantizar su eficacia. Factores como el mecanismo de molienda, que influye en la finura del material, y las condiciones de combustión, que afectan la composición química, pueden modificar significativamente el comportamiento del residuo en el concreto (Salem et al., 2022). Una evaluación integral de estos parámetros permitirá establecer rangos óptimos de sustitución y reducir la incertidumbre en los resultados, lo cual es esencial para su implementación a escala industrial.

Comparación y Análisis sobre Fibras Naturales

La incorporación de fibras naturales, como bambú, paja de maíz, agujas de pino rojo y fibras de celulosa, ha demostrado efectos positivos en las propiedades del concreto, especialmente en su resistencia mecánica e impermeabilidad. Entre ellas, las fibras de celulosa destacan por su buena adherencia a la matriz del concreto, atribuida a su longitud y capacidad de absorción de agua, que mejoran la cohesión del material. La longitud y dosificación de las fibras influyen directamente en su efectividad.

Las fibras con longitudes entre 12 y 24 mm han mostrado mejores resultados mecánicos, mientras que aquellas superiores a 50 mm tienden a reducir la trabajabilidad del concreto y generar una distribución no uniforme. Asimismo, dosis de hasta un 2 % en volumen pueden mejorar el desempeño mecánico, pero cantidades mayores pueden provocar dificultades en la mezcla y pérdida de rendimiento (Pham, 2025). Estos hallazgos coinciden con Wang et al. (2024), quienes señalan que las propiedades del concreto fresco y endurecido dependen estrechamente del tipo, tamaño y proporción óptima de fibra utilizada. Esto resalta la necesidad de adaptar estos parámetros a las condiciones estructurales específicas y al entorno de aplicación, ya que no existe una fórmula única aplicable a todos los casos.

El tratamiento previo de las fibras también influye significativamente en su comportamiento dentro del concreto. Según Akinyemi et al. (2020), Gao et al. (2022) y Hasan et al. (2023), técnicas como la impregnación alcalina o el desgomado son esenciales para eliminar compuestos como lignina y hemicelulosa y otros compuestos que afectan la durabilidad del material, ya que disminuyen la compatibilidad química y reducen la durabilidad del compuesto. La omisión de estos tratamientos puede

generar biodegradación prematura o una débil adherencia fibra-matriz.

En términos de funcionalidad, las macrofibras como las agujas de pino rojo, fibras de kenaf, paja de maíz, bambú y fibras de basalto son efectivas en el control del ancho de grietas y la prevención de su propagación. A pesar de sus ventajas en resistencia a tracción y módulos elásticos de hasta 303 GPa, estas fibras presentan limitaciones asociadas a su baja durabilidad a largo plazo y su débil adherencia con la matriz del concreto. Por su parte, las microfibras contribuyen a una distribución más homogénea de las tensiones internas y al control de presiones térmicas y de vapor en condiciones extremas (Pham, 2025).

Diversos estudios experimentales refuerzan estos hallazgos. Singh y Gupta (2020) reportaron que la adición de 0.5% de fibra de celulosa reduce la penetración de agua en un 24% y el coeficiente de permeabilidad en un 42% , mejorando la durabilidad del concreto en ambientes húmedos. De manera complementaria, Ma et al. (2020) destacaron que estas fibras también mejoran el comportamiento tensión-deformación en climas fríos, como se evidencia en la presa de la central hidroeléctrica de Nazixia.

Por otro lado, Igbokwe et al. (2024), documentaron una reducción del 85% en el ancho de grietas por contracción plástica, atribuyendo este efecto a la capacidad de las fibras de celulosa de retener agua , facilitando un curado interno y controlando las grietas en etapas tempranas . Estos hallazgos coinciden con los reportes de Wu et al. (2024) quienes destacan las ventajas de las fibras naturales en aplicaciones de alta durabilidad.

Implicaciones y Sostenibilidad

Los resultados de este estudio refuerzan el valor de utilizar residuos agrícolas y fibras naturales como sustitutos parciales del cemento y adiciones complementarias, ya que no solo contribuyen a reducir el consumo de recursos no renovables y la huella de carbono (CO₂) asociada a la producción de concreto, sino que también mejoran sus propiedades mecánicas y de durabilidad (Thomas et al., 2021). En este contexto, resulta especialmente relevante considerar que la fabricación de una tonelada de cemento Portland (PC) emite entre 1 y 1,25 toneladas de CO₂ a la atmósfera y demanda aproximadamente 1,60 MWh de energía, lo que representa un proceso intensivo en recursos y con alto impacto ambiental (Bheel et al., 2024a). La valorización de residuos como material cementante alternativo se presenta, por tanto, como una estrategia sostenible clave frente a los desafíos climáticos y energéticos actuales.

Limitaciones y Recomendaciones Futuras

Pese a los avances reportados, la evidencia disponible presenta limitaciones relevantes. Muchos estudios presentan una falta de uniformidad en los métodos de procesamiento, caracterización y dosificación, lo que dificulta la comparación entre resultados. En particular, residuos como la ceniza de tallo de maíz han mostrado un desempeño mecánico inferior -especialmente con sustituciones del 10 %, debido a su alta pérdida por ignición (9,1 %), indicativa de una elevada presencia de carbono no quemado. En consecuencia, se evidencia la necesidad de optimizar los procesos de calcinación y parámetros de finura, ya que su eficacia se restringe a bajos porcentajes de reemplazo.

Asimismo, la mayoría de las investigaciones se enfocan en ensayos de laboratorio, sin considerar aspectos como la durabilidad a largo plazo, la interacción con ambientes agresivos o el comportamiento estructural a escala real. Se recomienda promover estudios comparativos con protocolos estandarizados, ampliar el análisis a nuevas combinaciones de residuos y fibras naturales, e impulsar evaluaciones a escala piloto e industrial que permitan validar su viabilidad técnica, económica y ambiental para aplicaciones prácticas.

CONCLUSIONES

Los resultados revisados confirman que el uso de residuos agrícolas con propiedades puzolánicas, adecuadamente procesados, permite reducir la demanda de cemento; disminuyendo así las emisiones de CO₂ y promoviendo el aprovechamiento eficiente de desechos agrícolas. Esta estrategia mejora el desempeño del concreto, y al mismo tiempo, representa una alternativa viable en términos ambientales y económicos.

En particular, la ceniza de cáscara de arroz, utilizada como sustituto parcial del cemento en proporciones del 20%, ha logrado mejoras destacables en resistencias a la compresión de hasta 93,28 MPa y resistencia a la tracción de 6,52 MPa, superando incluso al concreto convencional. Por el contrario, la ceniza de tallo de maíz, a una dosificación del 10%, presentó valores mecánicos inferiores -atribuibles a su elevada pérdida por ignición-, situación que evidencia la necesidad de optimizar sus procesos de calcinación y molienda. Respecto a las fibras naturales, los estudios indican que proporciones entre 0.5% y 2% en volumen, con longitudes entre 2.1 mm y 50 mm, son eficaces para mejorar la resistencia a la compresión y flexión del concreto. No obstante, se requiere un tratamiento alcalino previo para eliminar lignina y componentes corrosivos, con el fin de asegurar una mejor adherencia a la matriz y una mayor durabilidad del material.

Entre las fibras analizadas, las de celulosa destacan por su capacidad para mejorar la resistencia a la tracción, reducir la permeabilidad en un 42% y controlar el ancho de grietas hasta en un 85%, además de

favorecer el curado interno gracias a su capacidad de retención de agua. Estas propiedades las posicionan como un refuerzo eficiente y sostenible para aplicaciones en climas húmedos o fríos.

En conjunto, los hallazgos respaldan el uso de residuos agrícolas y fibras naturales como alternativas sostenibles en la fabricación de concreto, contribuyendo a la reducción de la huella de carbono y fomentando prácticas constructivas ambientalmente responsables. Sin embargo, se requiere continuar con investigaciones estandarizadas a escala piloto e industrial para validar estos resultados en condiciones reales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Bahurudeen, A., Jyothsna, G., Sofi, A., Shanmugam, V., & Thomas, B. (2023). A comprehensive review on the use of natural fibers in cement/geopolymer concrete: A step towards sustainability. *Case Studies In Construction Materials*, 19, e02244. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02244>
- Abellan-Garcia, J., Martinez, D. M., Khan, M. I., Abbas, Y. M., & Pellicer-Martínez, F. (2023). Environmentally friendly use of rice husk ash and recycled glass waste to produce ultra-high-performance concrete. *Journal Of Materials Research And Technology*, 25, 1869-1881. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.041>
- Ahmad, J., Arbili, M. M., Alabduljabbar, H., & Deifalla, A. F. (2023). Concrete made with partially substitution corn cob ash: A review. *Case Studies In Construction Materials*, 18, e02100. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02100>
- Ahsan, M. B., & Hossain, Z. (2018). Supplemental use of rice husk ash (RHA) as a cementitious material in concrete industry. *Construction And Building Materials*, 178, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.101>
- Akinyemi, A. B., Omoniyi, E. T., & Onuzulike, G. (2020). Effect of microwave assisted alkali pretreatment and other pretreatment methods on some properties of bamboo fibre reinforced cement composites. *Construction And Building Materials*, 245, 118405. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118405>
- Ali, D. M., Chin, S. C., Bao, C., & Gimbun, J. (2024). Enhancement of reinforced concrete durability and performance by bamboo and basalt fibres. *Physics And Chemistry Of The Earth Parts A/B/C*, 103572. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103572>
- Basu, P., Kumar, R., & Das, M. (2023). Natural and manmade fibers as sustainable building materials. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.222>
- Bheel, N., Chohan, I. M., Alwetaishi, M., Waheeb, S. A., & Alkhatabi, L. (2024a). Sustainability assessment and mechanical characteristics of high strength concrete blended with marble dust powder and wheat straw ash as cementitious materials by using RSM modelling. *Sustainable Chemistry And Pharmacy*, 39, 101606. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2024.101606>
- Bheel, N., Kumar, S., Kirgiz, M. S., Ali, M., Almujiabah, H. R., Ahmad, M., & Gonzalez-Lezcano, R. A. (2024b). Effect of wheat straw ash as cementitious material on the mechanical characteristics and embodied carbon of concrete reinforced with coir fiber. *Heliyon*, 10(2), e24313. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24313>

- Cogurcu, M. T. (2022). Investigation of mechanical properties of red pine needle fiber reinforced self-compacting ultra high performance concrete. *Case Studies In Construction Materials*, 16, e00970. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00970>
- Gamage, N., Patrisia, Y., Gunasekara, C., Law, D. W., Houshyar, S., & Setunge, S. (2024). Shrinkage induced crack control of concrete integrating synthetic textile and natural cellulosic fibres: Comparative review analysis. *Construction And Building Materials*, 427, 136275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136275>
- Gao, X., Zhu, D., Fan, S., Rahman, M. Z., Guo, S., & Chen, F. (2022). Structural and mechanical properties of bamboo fiber bundle and fiber/bundle reinforced composites: a review. *Journal Of Materials Research And Technology*, 19, 1162-1190. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.05.077>
- Gavioli, L. M., Mármol, G., Lima, C. G., Teixeira, R. S., & Rossignolo, J. A. (2024). Comparative Performance of M-S-H Cement vs. Portland Cement in Fiber Cement Incorporating Bamboo Leaf Ash and Cellulosic Fibers. *Journal Of Building Engineering*, 91, 109644. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109644>
- Gouda, K. N., Babu, S. V., & Syed, A. B. (2023). Concrete making using salt water instead of fresh water. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.409>
- Gudainiyan, J., & Kishore, K. (2023). A review on cement concrete strength incorporated with agricultural waste. *Materials Today Proceedings*, 78, 396-402. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.179>
- Hasan, K. F., Champramary, S., Hasan, K. N. A., Indic, B., Ahmed, T., Pervez, M. N., Horváth, P. G., Bak, M., Sándor, B., Hofmann, T., Tolvaj, L., Horváth, A., Kóczán, Z., Sipos, G., Alpár, T., & Bejő, L. (2023). Eco-friendly production of cellulosic fibers from Scots pine wood and sustainable nanosilver modification: A path toward sustainability. *Results In Engineering*, 19, 101244. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101244>
- Hasan, N. M. S., Shaurdho, N. M. N., Basit, M. A., Paul, S. C., Sobuz, M. H. R., & Miah, M. J. (2023). Assessment of the rheological and mechanical properties of palmyra fruit mesocarp fibre reinforced eco-friendly concrete. *Construction And Building Materials*, 407, 133530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133530>
- Ja'e, I. A., Salih, A. R., Syamsir, A., Min, T. H., Itam, Z., Amaechi, C. V., Anggraini, V., & Sridhar, J. (2023). Experimental and predictive evaluation of mechanical properties of kenaf-polypropylene fibre-reinforced concrete using response surface methodology. *Developments In The Built Environment*, 16, 100262. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100262>
- Jha, P., Sachan, A., & Singh, R. (2021). Agro-waste sugarcane bagasse ash (ScBA) as partial replacement of binder material in concrete. *Materials Today Proceedings*, 44, 419-427. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.751>
- Jin, Z., Mao, S., Zheng, Y., & Liang, K. (2023). Pre-treated corn straw fiber for fiber-reinforced concrete preparation with high resistance to chloride ions corrosion. *Case Studies In Construction Materials*, 19, e02368. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02368>
- Kareem, M., Raheem, A., Oriola, K., & Abdulwahab, R. (2022). A review on application of oil palm shell as aggregate in concrete - Towards realising a pollution-free environment and sustainable concrete. *Environmental Challenges*, 8, 100531. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100531>

- Ma, W., Qin, Y., Li, Y., Chai, J., Zhang, X., Ma, Y., & Liu, H. (2020). Mechanical properties and engineering application of cellulose fiber-reinforced concrete. *Materials Today Communications*, 22, 100818. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2019.100818>
- Maglad, A. M., Amin, M., Zeyad, A. M., Tayeh, B. A., & Agwa, I. S. (2023a). Engineering properties of ultra-high strength concrete containing sugarcane bagasse and corn stalk ashes. *Journal Of Materials Research And Technology*, 23, 3196-3218. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.197>
- Meng, C., Li, W., Cai, L., Shi, X., & Jiang, C. (2020). Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete: Resistance to sulfate attack and freezing-thawing. *Construction And Building Materials*, 262, 120055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120055>
- Mostafa, S. A., Tayeh, B. A., & Almeshal, I. (2022). Investigation the properties of sustainable ultra-high-performance basalt fibre self-compacting concrete incorporating nano agricultural waste under normal and elevated temperatures. *Case Studies In Construction Materials*, 17, e01453. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01453>
- Nduka, D. O., Olawuyi, B. J., Ajao, A. M., Okoye, V. C., & Okigbo, O. M. (2022). Mechanical and durability property dimensions of sustainable bamboo leaf ash in high-performance concrete. *Cleaner Engineering And Technology*, 11, 100583. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100583>
- Padavala, S. S. A. B., Dey, S., Veerendra, G., & Manoj, A. V. P. (2024). Experimental study on concrete by partial replacement of cement with fly ash and coarse aggregates with palm kernel shells (Pks) and with addition of hybrid fibers. *Chemistry Of Inorganic Materials*, 2, 100033. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2024.100033>
- Paul, S. C., Mbewe, P., Kong, S., & Šavija, B. (2019). Agricultural Solid Waste as Source of Supplementary Cementitious Materials in Developing Countries. *Materials*, 12(7), 1112. <https://doi.org/10.3390/ma12071112>
- Pham, T. M. (2025). Fibre-reinforced concrete: state-of-the-art-review on bridging mechanism, mechanical properties, durability, and eco-economic analysis. *Case Studies In Construction Materials*, e04574. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04574>
- Rajkohila, A., Chandar, S. P., & Ravichandran, N. P. T. (2024). Assessing the effect of natural fiber on mechanical properties and microstructural characteristics of high strength concrete. *Ain Shams Engineering Journal*, 102666. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102666>
- Ramakrishna, J., & Gopi, R. (2023). Experimental investigation on partial replacement of cement and coarse aggregate by rice husk ash and steel slag in concrete. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.08.340>
- Roselló, J., Soriano, L., Santamarina, M. P., Akasaki, J. L., Monzó, J., & Payá, J. (2017). Rice straw ash: A potential pozzolanic supplementary material for cementing systems. *Industrial Crops And Products*, 103, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.030>
- Salem, S., Hamdy, Y., Abdelraouf, E., & Shazly, M. (2022). Towards sustainable concrete: Cement replacement using Egyptian cornstalk ash. *Case Studies In Construction Materials*, 17, e01193. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01193>
- Singh, H., & Gupta, R. (2020a). Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV. *Journal Of Building Engineering*, 28, 101090. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101090>

- Singh, H., & Gupta, R. (2020b). Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete. *Case Studies In Construction Materials*, 12, e00324. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00324>
- Thomas, B. S., Yang, J., Mo, K. H., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., & Ariyachandra, E. (2021). Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolymer concrete: A comprehensive review. *Journal Of Building Engineering*, 40, 102332. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102332>
- Wang, X., Jin, Y., Ma, Q., & Li, X. (2024). Performance and mechanism analysis of natural fiber-reinforced foamed concrete. *Case Studies In Construction Materials*, 21, e03476. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03476>
- Wei, Y., Song, C., Chen, B., & Ahmad, M. R. (2019). Experimental investigation on two new corn stalk biocomposites based on magnesium phosphate cement and ordinary Portland cement. *Construction And Building Materials*, 224, 700-710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.100>
- Wu, H., Shen, A., Ren, G., He, Z., Wang, W., & Ma, B. (2024). An experimental investigation and optimization of the properties of concrete containing cellulose fiber based on system theory. *Construction And Building Materials*, 411, 134463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134463>
- Xu, H., Shao, Z., Wang, Z., Cai, L., Li, Z., Jin, H., & Chen, T. (2020). Experimental study on mechanical properties of fiber reinforced concrete: Effect of cellulose fiber, polyvinyl alcohol fiber and polyolefin fiber. *Construction And Building Materials*, 261, 120610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120610>
- Zareei, S. A., Ameri, F., Dorostkar, F., & Ahmadi, M. (2017). Rice husk ash as a partial replacement of cement in high strength concrete containing micro silica: Evaluating durability and mechanical properties. *Case Studies In Construction Materials*, 7, 73-81. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.001>