



Influencia de la fibra de coco como adición sostenible en el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón estructural

Influence of coconut fiber as a sustainable additive on the modulus of elasticity and compressive strength of structural concrete

 <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v10.n3.2026.4-21>

Recibido: 10-05-2026

Aceptado: 10-08-2026

Publicado: 01-10-2026

Geovanny Alexander Parrales Pinargote^{1*}

 <https://orcid.org/0009-0006-8609-1039>

Byron Patricio Baque Campozano²

 <https://orcid.org/0000-0001-9701-2179>

1. Universidad Estatal del Sur de Manabí; Jipijapa, Ecuador.
2. Universidad Estatal del Sur de Manabí; Jipijapa, Ecuador.

Volumen: 10

Número: 3

Año: 2026

Paginación: 4-21

URL: <https://revistas.unesum.edu.ec/index.php/unesumciencias/article/view/1191>

***Correspondencia autor:** geovanny@gmail.com

RESUMEN

La incorporación de residuos agroindustriales en materiales cementicios permite explorar alternativas para aprovechar recursos lignocelulósicos y mejorar determinadas propiedades del hormigón. El objetivo fue evaluar el efecto de diferentes dosificaciones de fibra de coco tratada sobre la resistencia a la compresión y estimar el módulo estático de elasticidad mediante una correlación calibrada experimentalmente con la mezcla patrón. Se elaboraron cuatro mezclas con 0, 0,5, 1,0 y 1,5 % de fibra respecto a la masa de cemento. Se ensayaron 24 cilindros de 100 × 200 mm a los 7, 14 y 28 días, y se determinó el asentamiento del hormigón fresco. En siete cilindros de la mezcla patrón se midió directamente el módulo estático conforme a ASTM C469/C469M, mientras que en las mezclas modificadas se estimó mediante la expresión $E_c = 3035,67 \sqrt{f_c}$. El asentamiento disminuyó de 85 a 75 mm al aumentar la dosificación. A los 28 días, las resistencias fueron 21,23; 21,65; 22,08 y 20,40 MPa, respectivamente. La mezcla con 1,0 % presentó el mayor incremento, con 3,99 % respecto al patrón. El módulo medido en el control fue 13,971 GPa, mientras que los valores estimados para 0,5, 1,0 y 1,5 % fueron 14,12; 14,26 y 13,71 GPa. La dosificación de 1,0 % ofreció el mejor equilibrio entre trabajabilidad y comportamiento mecánico, aunque su influencia directa sobre la rigidez deberá verificarse mediante ensayos de deformación en todas las mezclas.

Palabras clave: Residuo agroindustrial, Material lignocelulósico, Trabajabilidad, Dosificación, Correlación experimental

ABSTRACT

The incorporation of agro-industrial waste into cementitious materials provides an alternative for using lignocellulosic resources and improving selected concrete properties. This study evaluated the effect of different dosages of treated coconut fiber on compressive strength and estimated the static modulus of elasticity through a correlation experimentally calibrated with the control mixture. Four mixtures containing 0, 0.5, 1.0, and 1.5% fiber by cement mass were produced. Twenty-four 100 × 200 mm cylinders were tested at 7, 14, and 28 days, and the slump of the fresh concrete was determined. The static modulus was measured directly in seven control cylinders according to ASTM C469/C469M, whereas it was estimated for the fiber-modified mixtures using the expression $E_c = 3035.67 \sqrt{f_c}$. Slump decreased from 85 to 75 mm as the dosage increased. At 28 days, compressive strengths were 21.23, 21.65, 22.08, and 20.40 MPa, respectively. The 1.0% mixture showed the greatest increase, reaching 3.99% above the control. The measured modulus of the control was 13.971 GPa, while the estimated values for 0.5, 1.0, and 1.5% were 14.12, 14.26, and 13.71 GPa. The 1.0% dosage provided the best balance between workability and mechanical performance; however, its direct influence on stiffness should be verified through deformation tests on all mixtures.

Keywords: Agro-industrial waste, Lignocellulosic material, Workability, Mix proportioning, Experimental correlation.



Creative Commons Attribution 4.0
International (CC BY 4.0)

Introducción

El hormigón constituye uno de los materiales más utilizados en la construcción debido a su disponibilidad, capacidad resistente, durabilidad y adaptación a diversas condiciones de servicio. Su producción, sin embargo, requiere grandes cantidades de materias primas, agua y energía, y mantiene una relación directa con los impactos ambientales generados por la industria del cemento y la extracción de agregados. Miller, Horvath y Monteiro (2018) identificaron que el crecimiento de la producción mundial de hormigón incrementa la presión sobre los recursos hídricos, mientras que Scrivener, John y Gartner (2018) señalaron la necesidad de desarrollar materiales cementicios capaces de conservar sus prestaciones técnicas con una menor demanda de recursos. Habert et al. (2020) sostuvieron que la reducción de los impactos asociados al cemento y al hormigón requiere combinar mejoras tecnológicas con el aprovechamiento eficiente de materiales alternativos.

Una de las líneas de investigación desarrolladas para atender esta necesidad corresponde a la incorporación de residuos agroindustriales en matrices cementicias. Entre estos materiales se encuentran las fibras vegetales, cuya disponibilidad, baja densidad y procedencia renovable permiten considerarlas como refuerzos dispersos para hormigones y morteros. Su empleo no implica necesariamente una reducción directa del contenido de cemento, pero puede favorecer la valorización de residuos que, de otra manera, serían depositados, quemados o eliminados sin aprovechamiento técnico. En este sentido, la fibra obtenida del mesocarpio del coco presenta interés para las regiones tropicales y costeras, donde este residuo puede encontrarse disponible en cantidades aprovechables.

La fibra de coco posee una estructura lignocelulósica, superficie rugosa y capacidad para deformarse antes de la rotura. Cuando se distribuye adecuadamente dentro de la

matriz cementicia, puede actuar como elemento de puenteo entre las caras de una fisura, restringir su propagación y contribuir a la absorción de energía. Ahmad et al. (2022) y Martinelli et al. (2023) indicaron que estos mecanismos pueden modificar la resistencia, la tenacidad, la ductilidad y el comportamiento posterior al agrietamiento del material. El crecimiento de las publicaciones sobre fibra de coco en compuestos cementicios también refleja el interés científico por determinar sus posibilidades de aplicación y las condiciones necesarias para obtener mezclas con un desempeño mecánico aceptable (Gu et al., 2022).

Los efectos de la fibra no siguen necesariamente una tendencia lineal. La respuesta del hormigón depende de la longitud, el contenido, la orientación, la dispersión y el estado superficial de las fibras. Ahmad et al. (2020) comprobaron que la modificación simultánea de la longitud y la dosificación produce diferencias apreciables en las propiedades del hormigón, mientras que Khan y Ali (2019) observaron que la respuesta mecánica también depende de la composición de la matriz y de la interacción con otros materiales cementicios. Los estudios de Shah et al. (2022), Guruswamy et al. (2024) y Bediako et al. (2025) mostraron que las dosificaciones moderadas pueden favorecer determinadas propiedades, pero un aumento excesivo del contenido fibroso puede disminuir la resistencia debido a dificultades de mezclado, distribución deficiente y formación de vacíos.

La trabajabilidad representa una de las propiedades más sensibles a la incorporación de fibras naturales. La geometría alargada de las fibras incrementa la fricción interna, restringe el movimiento de los agregados y dificulta la compactación cuando su concentración es elevada. Su capacidad de absorción también puede modificar la cantidad de agua disponible dentro de la mezcla. Ahmad et al. (2021) señalaron que el comportamiento del hormigón reforzado con fibra de coco depende del equilibrio

entre el efecto de refuerzo y los cambios producidos en la consistencia y la porosidad. Una reducción pronunciada del asentamiento puede generar defectos internos que contrarresten el posible control de fisuras aportado por la fibra.

La condición superficial de la fibra influye en su adherencia con la pasta de cemento. Las sustancias orgánicas, ceras e impurezas presentes en la fibra sin acondicionamiento pueden interferir con la unión fibra-matriz y con los procesos de hidratación. Olonade y Savastano Junior (2023) comprobaron que el tratamiento previo modifica las propiedades superficiales y la respuesta de la fibra dentro de sistemas cementicios. Martinelli et al. (2024) también evidenciaron que las condiciones de secado pueden alterar sus características físicas y mecánicas. Tales resultados justifican el acondicionamiento de las fibras antes del mezclado, aunque el desempeño final depende del procedimiento aplicado, del tiempo de exposición, del lavado y de la condición de humedad previa a su incorporación.

La mayor parte de las investigaciones sobre hormigón con fibra de coco se ha concentrado en la resistencia a la compresión, la tracción, la flexión, el comportamiento frente al impacto y la durabilidad. Wang y Chouw (2017) demostraron que la acción de las fibras puede mejorar la absorción de energía bajo cargas de impacto, mientras que Sekar y Kandasamy (2018) identificaron que la dosificación condiciona las propiedades mecánicas y de adherencia del compuesto. No obstante, la rigidez del hormigón reforzado con fibra de coco ha recibido una atención comparativamente menor, pese a su importancia para la evaluación de deformaciones y deflexiones bajo cargas de servicio.

El módulo estático de elasticidad expresa la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación producida dentro del intervalo de respuesta aproximadamente elástica del hormigón. Esta propiedad interviene en la estimación de acortamientos, des-

plazamientos, distribución de esfuerzos y comportamiento estructural. Ali, Liu, Sou y Chouw (2012) determinaron que la incorporación de fibra de coco puede modificar el módulo estático, debido a que la fibra posee una rigidez menor que los agregados minerales y altera la microestructura de la matriz. En consecuencia, un incremento de la resistencia a la compresión no implica necesariamente un aumento proporcional de la rigidez. El control de fisuras, la capacidad de deformación, la adherencia fibra-pasta y la porosidad pueden producir variaciones diferenciadas entre ambas propiedades.

Las ecuaciones empleadas para estimar el módulo de elasticidad suelen establecerlo como una función de la resistencia a la compresión y de la densidad del hormigón. Estas relaciones fueron desarrolladas principalmente para hormigones convencionales, por lo que su aplicación a mezclas con fibras naturales requiere cautela. La presencia de un componente de menor rigidez, alta absorción y comportamiento heterogéneo puede modificar la relación habitual entre resistencia y deformación. Resulta necesario, entonces, disponer de una referencia experimental que permita calibrar la estimación del módulo y examinar cómo cambia frente a diferentes contenidos de fibra.

En las zonas costeras del Ecuador, particularmente en la provincia de Manabí, el aprovechamiento de la fibra de coco ofrece una alternativa para vincular el manejo de residuos agrícolas con el desarrollo de materiales para la construcción. Sin embargo, su incorporación debe sustentarse en resultados mecánicos verificables y no únicamente en su origen natural. La determinación de una dosificación adecuada requiere estudiar simultáneamente la consistencia del hormigón fresco, la resistencia a la compresión y la rigidez asociada a cada mezcla.

El objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia de la fibra de coco tratada con lechada de cal, incorporada en proporciones de 0,5 %, 1,0 % y 1,5 % respecto a la

masa del cemento, sobre la resistencia a la compresión del hormigón estructural y estimar el módulo estático de elasticidad mediante una correlación calibrada experimentalmente con la mezcla patrón. También se analizó la relación entre la variación de la resistencia y los valores estimados de rigidez. Se planteó como hipótesis que la dosificación de fibra produce una respuesta mecánica no lineal: los contenidos moderados pueden conservar o incrementar el desempeño del hormigón, mientras que una proporción elevada puede reducir la resistencia y el módulo estimado como consecuencia de la pérdida de trabajabilidad, la dispersión insuficiente y el aumento de vacíos en la matriz.

Materiales y métodos

Diseño experimental

La investigación se desarrolló en el laboratorio de la cantera Megarok, provincia de Manabí, Ecuador, mediante un enfoque cuantitativo y un diseño experimental comparativo. Se estudió una mezcla patrón sin fibra y tres mezclas modificadas con fibra de coco tratada, incorporada en proporciones de 0,5 %, 1,0 % y 1,5 % respecto a la masa del cemento. La fibra se utilizó como adición y no como sustitución parcial del cemento o de los agregados.

La variable independiente fue la dosificación de fibra de coco tratada. Como variables de respuesta se consideraron el asentamiento del hormigón fresco, la resistencia a la compresión y el módulo estático de elasticidad estimado. La resistencia nominal de diseño fue de 210 kgf/cm², equivalente a 20,59 MPa y considerada operativamente como un hormigón de 21 MPa.

Para evaluar la resistencia a la compresión se elaboraron dos probetas por cada combinación de dosificación y edad de ensayo. Se estudiaron cuatro mezclas a los 7, 14 y 28 días, lo que representó un total de 24 cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura. La distribución experimental corres-

pondió a seis cilindros para la mezcla patrón y seis para cada dosificación de fibra.

De forma complementaria, se emplearon los resultados de siete cilindros de la mezcla patrón, ensayados a los 28 días mediante medición directa de esfuerzo y deformación. Estos datos permitieron determinar el módulo estático de elasticidad del hormigón de referencia y calibrar una expresión local para estimar esta propiedad en las mezclas modificadas con fibra.

Materiales

Las mezclas se elaboraron con cemento hidráulico tipo GU, agua, agregado fino, agregado grueso y fibra de coco procedente del mesocarpio del fruto. El agregado fino correspondió a arena triturada comercializada como arena Megamezcla. Para el agregado grueso se utilizó una combinación de 70 % de piedra n.º 6 y 30 % de piedra n.º 7, con tamaños nominales máximos de 19 y 12,5 mm, respectivamente.

La densidad en condición saturada y superficialmente seca del agregado fino fue de 2618 kg/m³. Para las piedras n.º 6 y n.º 7 se registraron densidades de 2599 y 2594 kg/m³, respectivamente. La combinación de los dos tamaños de agregado grueso se adoptó después de ajustar el diseño inicial, con el propósito de mejorar la trabajabilidad y facilitar el acabado de las probetas.

Tratamiento de la fibra de coco

La fibra de coco se sometió a un acondicionamiento previo con una lechada de hidróxido de calcio [Ca(OH)₂]. La solución se preparó con una concentración de 10 g de hidróxido de calcio por cada litro de agua. Las fibras permanecieron completamente sumergidas durante 48 horas.

Finalizado el periodo de tratamiento, se enjuagaron varias veces con agua limpia hasta retirar los residuos visibles de la lechada. Luego se secaron al ambiente durante aproximadamente 24 horas y se cortaron en longitudes comprendidas entre 15 y 25 mm.

Una vez secas y dimensionadas, se pesaron de acuerdo con la dosificación correspondiente y se conservaron protegidas de la humedad hasta su incorporación al hormigón.

Diseño y dosificación de las mezclas

La mezcla patrón se diseñó mediante el procedimiento de volúmenes absolutos establecido por el American Concrete Institute en ACI 211.1-91 (American Concrete Insti-

tute, 1991). Luego de realizar ajustes experimentales en la combinación granulométrica, se adoptó una relación agua/cemento de 0,54 para todas las mezclas.

Las cantidades de cemento, agua, agregado fino y agregado grueso se mantuvieron constantes. La única modificación entre tratamientos correspondió a la masa de fibra de coco incorporada. En la Tabla 1 se presenta la composición de las cuatro mezclas.

Tabla 1.

Dosificación de las mezclas evaluadas / Mix proportions of the evaluated mixtures

Material	Patrón	Fibra 0,5 %	Fibra 1,0 %	Fibra 1,5 %
Agua (kg/m ³)	230,00	230,00	230,00	230,00
Cemento tipo GU (kg/m ³)	425,00	425,00	425,00	425,00
Agregado grueso (kg/m ³)	959,00	959,00	959,00	959,00
Agregado fino (kg/m ³)	670,00	670,00	670,00	670,00
Fibra de coco (kg/m ³)	0,00	2,13	4,25	6,38
Fibra por lote (kg)	0,00000	0,04675	0,09350	0,14025
Relación agua/cemento	0,54	0,54	0,54	0,54

Nota: La fibra se incorporó como adición respecto a la masa del cemento. Cada lote correspondió aproximadamente a 0,022 m³ de hormigón. El agregado grueso estuvo compuesto por 70 % de piedra n.º 6 y 30 % de piedra n.º 7.

Elaboración y curado de las probetas

Los componentes de cada lote se pesaron de acuerdo con las cantidades establecidas en el diseño. La fibra tratada se incorporó según la proporción asignada a cada mezcla, procurando distribuirla en el hormigón y evitar concentraciones localizadas.

Después del mezclado se realizó el ensayo de asentamiento. El hormigón fresco se colocó en moldes cilíndricos de 100 × 200 mm y se compactó para reducir la presencia de vacíos. Las probetas se identificaron según la dosificación de fibra y la edad programada para el ensayo.

Una vez desmoldados, los cilindros se trasladaron a la piscina de curado del laboratorio de la cantera Megarok. Allí permanecieron sumergidos hasta alcanzar las edades de 7, 14 y 28 días, momento en que fueron retirados para los ensayos mecánicos.

Ensayo de asentamiento

La trabajabilidad se evaluó mediante el ensayo de asentamiento con cono de Abrams, siguiendo las disposiciones de ASTM C143/C143M-20 y NTE INEN 1578:2010 (ASTM International, 2020; Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010). El asentamiento se expresó en centímetros y se utilizó para examinar la variación de la consistencia producida por el incremento del contenido de fibra.

La relación agua/cemento se mantuvo sin cambios entre las mezclas. Esta condición permitió analizar la reducción del asentamiento como una respuesta asociada principalmente a la incorporación progresiva de fibra de coco.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se determinó conforme a ASTM C39/C39M-23 (ASTM International, 2023). Las probetas se sometieron a carga axial hasta alcanzar la rotura y se registró la carga máxima soportada por cada cilindro.

La resistencia se calculó mediante la ecuación:

$$f'_c = \frac{P}{A}$$

donde:

f'_c = resistencia a la compresión, MPa;

P = carga máxima aplicada, N;

A = área de la sección transversal de la probeta, mm².

Los valores registrados inicialmente en kgf/cm² se transformaron a megapascuales mediante la relación:

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 0,0980665 \text{ MPa}$$

Para cada dosificación y edad se calculó la resistencia promedio de las dos probetas ensayadas. También se determinó la variación porcentual respecto a la mezcla patrón y el porcentaje de cumplimiento frente a la resistencia nominal de 210 kgf/cm².

Determinación experimental del módulo estático de elasticidad

El módulo estático de elasticidad de la mezcla patrón se determinó en siete cilindros de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, ensayados a los 28 días. La medición se realizó mediante un compresómetro provisto de un reloj comparador, mientras los especímenes eran sometidos a carga axial en una máquina de compresión.

El procedimiento de cálculo siguió el método secante descrito en ASTM C469/C469M-22 (ASTM International, 2022). Para cada cilindro se identificó el esfuerzo correspondiente a una deformación longitudinal de 50×10^{-6} y el esfuerzo equivalente al 40 % de la resistencia máxima.

El módulo se determinó mediante:

$$E_c = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,000050}$$

donde:

E_c = módulo estático de elasticidad, MPa;

S_1 = esfuerzo correspondiente a una deformación longitudinal de 0,000050, MPa;

S_2 = esfuerzo correspondiente al 40 % de la resistencia máxima, MPa;

ϵ_2 = deformación unitaria registrada para S_2 .

Los siete cilindros presentaron un módulo promedio de 13 971,14 MPa y una resistencia media de 21,18 MPa. A partir de ambos valores se obtuvo un coeficiente experimen-

tal para relacionar el módulo con la raíz cuadrada de la resistencia:

$$K = \frac{\bar{E}_c}{\sqrt{\bar{f}_c}}$$

El coeficiente obtenido fue:

$$K = 3035,67 \text{ MPa}^{0,5}$$

Estimación del módulo en las mezclas con fibra

Debido a que las mezclas con 0,5 %, 1,0 % y 1,5 % de fibra no fueron sometidas a mediciones directas de deformación longitudinal, sus módulos se estimaron mediante la correlación calibrada con los cilindros de la mezcla patrón:

$$E_{c,est} = 3035,67 \sqrt{f'_c}$$

donde:

$E_{c,est}$ = módulo estático de elasticidad estimado, MPa;

f'_c = resistencia promedio a la compresión a los 28 días, MPa.

La estimación se restringió a los resultados de 28 días, debido a que la calibración experimental del coeficiente se realizó con cilindros ensayados a esa edad. Los valores calculados se interpretaron como estimaciones derivadas de la resistencia y no como resultados obtenidos mediante ensayos directos ASTM C469/C469M.

Procesamiento de los datos

El análisis se realizó mediante estadística descriptiva. Para la resistencia a la compresión se calcularon los valores individuales, la media de cada grupo, la diferencia entre réplicas y la variación porcentual respecto a la mezcla patrón. Para los siete resultados

directos del módulo de elasticidad se determinaron la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

El efecto de la dosificación se examinó comparando los resultados de cada mezcla con el hormigón patrón. No se aplicaron pruebas estadísticas inferenciales a la resistencia a la compresión debido a que cada condición estuvo representada por dos probetas. Tampoco se calculó una correlación inferencial entre la resistencia y el módulo estimado, puesto que este último se obtuvo matemáticamente a partir de la propia resistencia a la compresión.

Resultados

Trabajabilidad de las mezclas

El asentamiento disminuyó conforme aumentó la proporción de fibra de coco. La mezcla patrón alcanzó 85 mm, mientras que las mezclas con 0,5 %, 1,0 % y 1,5 % registraron 82, 80 y 75 mm, respectivamente. La reducción más pronunciada correspondió a la dosificación de 1,5 %, cuyo asentamiento fue 11,76 % menor que el obtenido en el hormigón sin fibra.

Los valores registrados permitieron moldear y compactar las probetas de las cuatro mezclas. Sin embargo, la tendencia descendente evidenció que el aumento de la fibra modificó progresivamente la consistencia del hormigón fresco.

Tabla 2.

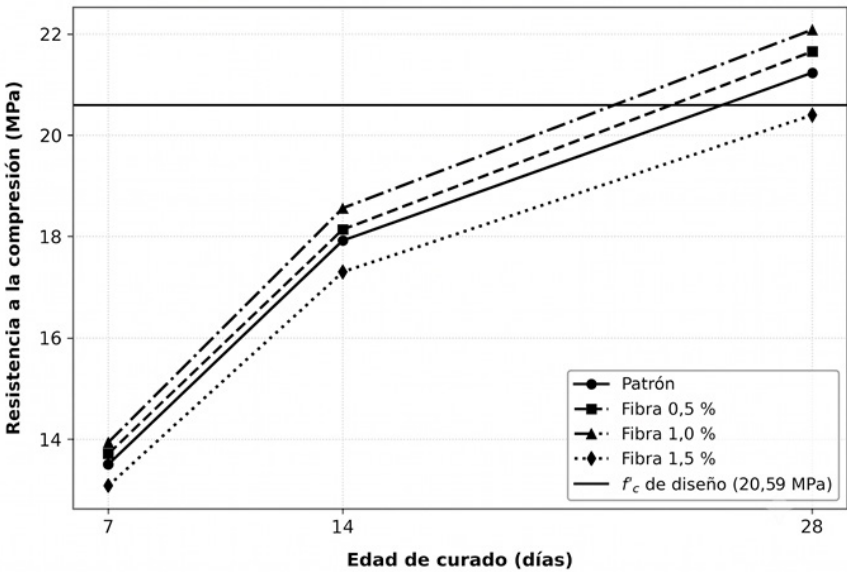
Asentamiento de las mezclas según la dosificación de fibra de coco / Slump of the mixtures according to coconut fiber dosage

Mezcla	Fibra de coco (%)	Asentamiento (mm)	Variación respecto al patrón (%)
Patrón	0,0	85	0,00
Fibra 0,5 %	0,5	82	-3,53
Fibra 1,0 %	1,0	80	-5,88
Fibra 1,5 %	1,5	75	-11,76

Nota: La variación se calculó respecto al asentamiento de la mezcla patrón.

Figura 1.

Variación del asentamiento según la dosificación de fibra de coco



Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión aumentó con la edad de curado en todas las mezclas. A los 7 días, los valores promedio estuvieron comprendidos entre 13,08 y 13,93 MPa. A los 14 días variaron entre 17,30 y 18,56 MPa, mientras que a los 28 días se encontraron entre 20,40 y 22,08 MPa.

La dosificación de 1,0 % obtuvo las mayores resistencias en las tres edades evaluadas. Esta mezcla alcanzó 13,93 MPa a los 7 días, 18,56 MPa a los 14 días y 22,08 MPa a los 28 días. Frente a la mezcla patrón, dichos resultados representaron incrementos de 3,23 %, 3,54 % y 3,99 %, respectivamente.

La incorporación de 0,5 % también produjo resistencias superiores a las del hormigón patrón, aunque con variaciones más reducidas. A los 28 días alcanzó 21,65 MPa, equivalente a un incremento de 1,97 %. En

cambio, la mezcla con 1,5 % presentó los menores valores en las tres edades y registró 20,40 MPa a los 28 días, lo que representó una reducción de 3,88 % respecto al patrón.

Tabla 3.

Resistencia promedio a la compresión según la dosificación de fibra y la edad de curado

Mezcla	7 días (MPa)	14 días (MPa)	28 días (MPa)	Variación respecto al patrón (%)	Resistencia alcanzada a 28 días (%)	de diseño
Patrón	13,50 0,35	± 17,92 0,17	± 21,23 0,17	± 0,00	103,08	
Fibra 0,5 %	13,71 0,12	± 18,14 0,19	± 21,65 0,21	± 1,97	105,12	
Fibra 1,0 %	13,93 0,25	± 18,56 0,20	± 22,08 0,19	± 3,99	107,19	
Fibra 1,5 %	13,08 0,24	± 17,30 0,24	± 20,40 0,16	± -3,88	99,08	

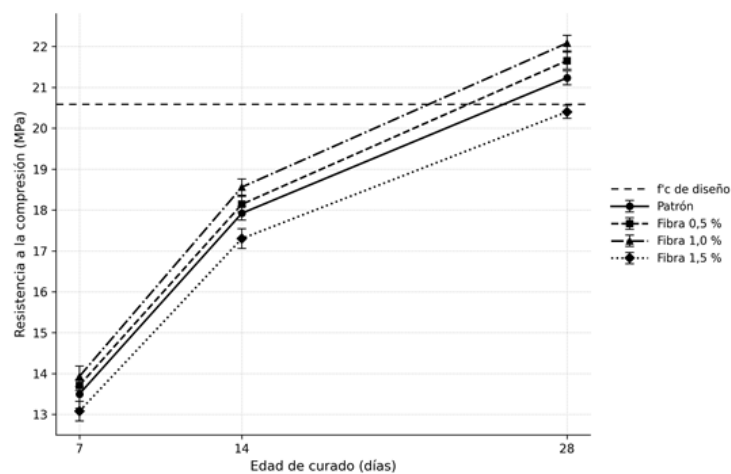
Nota: Los resultados se expresan como media $\pm$ desviación estándar de dos probetas. La resistencia especificada fue de 210 kgf/cm², equivalente a 20,59 MPa.

La mezcla patrón y las dosificaciones de 0,5 % y 1,0 % superaron la resistencia especificada a los 28 días. La mezcla con 1,5 % alcanzó el 99,08 % del valor de diseño y quedó 0,19 MPa por debajo de la resistencia establecida.

La dispersión entre las probetas fue reducida. Los coeficientes de variación estuvieron comprendidos entre 0,78 % y 2,56 %, y las diferencias entre las dos probetas de cada condición permanecieron por debajo del límite de 8 % adoptado durante el control experimental. La mayor variabilidad se presentó en la mezcla patrón a los 7 días, mientras que los menores coeficientes se obtuvieron a los 28 días. La Figura 2 muestra la evolución de las resistencias medias y su dispersión en las tres edades de curado.

Figura 2.

Evolución de la resistencia a la compresión según la edad de curado y la dosificación de fibra



Nota: Los puntos representan los valores medios y las barras de error corresponden a la desviación estándar de dos probetas. La línea horizontal indica la resistencia especificada de 20,59 MPa.

Módulo estático de elasticidad de la mezcla patrón

La medición directa del módulo estático de elasticidad se efectuó en siete cilindros de la mezcla patrón. Los valores individuales estuvieron comprendidos entre 13,811 y 14,124 GPa. El promedio fue de 13,971 GPa, con una desviación estándar

de 0,105 GPa y un coeficiente de variación de 0,75 %.

La resistencia promedio asociada a los siete cilindros fue de 21,18 MPa. Los factores individuales obtenidos mediante la relación $E_c/\sqrt{f'_c}$ variaron entre 3000,88 y 3067,57 MPa^{0,5}, con un promedio de 3035,67 MPa^{0,5}.

Tabla 4.

Resultados experimentales del módulo estático de elasticidad de la mezcla patrón / Experimental static modulus of elasticity results for the reference mixture

Cilindro	Resistencia a la compresión (MPa)	Módulo estático E_c (GPa)	Factor $E_c/\sqrt{f'_c}$ (MPa ^{0,5})
1	21,19	13,940	3028,35
2	21,12	13,956	3036,68
3	21,16	14,085	3061,90
4	21,18	13,811	3000,88
5	21,20	14,124	3067,57

6	21,21	13,965	3032,27
7	21,21	13,918	3022,06
Promedio 21,18		13,971	3035,67

Nota: El módulo se determinó mediante el procedimiento secante de ASTM C469/C469M. El factor promedio se utilizó posteriormente para estimar el módulo de las mezclas confi bra.

La reducida dispersión de los resultados mostró uniformidad entre los cilindros utilizados para la calibración. El rango entre el valor máximo y el mínimo del módulo fue de 0,314 GPa.

Módulo estático de elasticidad estimado

El módulo estático de elasticidad de las mezclas evaluadas se estimó a los 28 días mediante el factor experimental de 3035,67 MPa^{0.5}. La mezcla patrón utilizada en la campaña de resistencia presentó un módu-

lo estimado de 13,99 GPa. Las dosificacio- nes de 0,5 % y 1,0 % alcanzaron valores de 14,12 y 14,26 GPa, respectivamente.

El mayor módulo estimado correspondió a la mezcla con 1,0 % de fibra, con un incre- mento de 1,98 % frente al patrón. La mezcla con 0,5 % registró un aumento de 0,98 %. En contraste, la dosificación de 1,5 % pre- sentó un módulo estimado de 13,71 GPa, equivalente a una reducción de 1,96 %.

Tabla 5.

Módulo estático de elasticidad estimado a los 28 días / Estimated static modulus of elasti- city at 28 days

Mezcla	Fibra de coco (%)	de Resistencia a compresión (MPa)	la Módulo estimado (MPa)	Módulo estimado (GPa)	Variación respecto al patrón (%)
Patrón	0,0	21,23	13 986,7	13,99	0,00
Fibra 0,5 %	0,5	21,65	14 124,1	14,12	+0,98
Fibra 1,0 %	1,0	22,08	14 263,0	14,26	+1,98
Fibra 1,5 %	1,5	20,40	13 712,5	13,71	-1,96

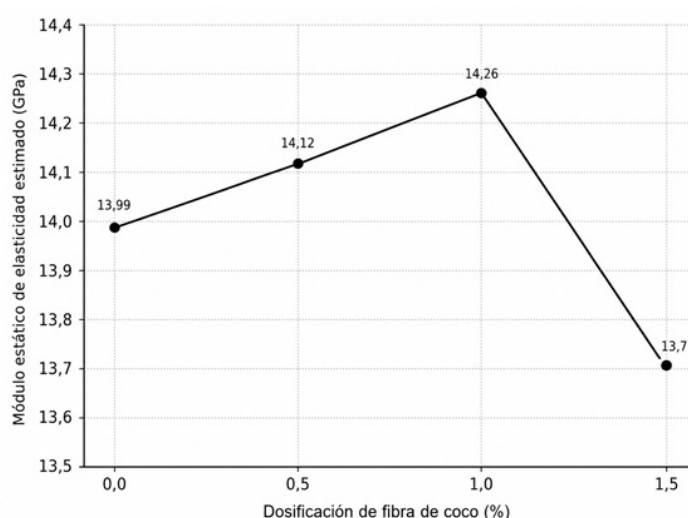
Nota: Los módulos de las mezclas con fibra se estimaron mediante la expresión $E_{c,est} = 3035,67 \cdot f_c'$, con f_c' y E_c expresados en MPa. Estos valores no correspondieron a mediciones directas de deformación.

La dosificación de fibra de coco produjo una variación no lineal en el módulo estático de elasticidad estimado a los 28 días. El valor aumentó desde 13,99 GPa en la mezcla patrón hasta 14,12 GPa y 14,26 GPa con las dosificaciones de 0,5 % y 1,0 %, respectiva-

mente. Al incorporar 1,5 % de fibra, el módulo descendió a 13,71 GPa, por lo que la mezcla con 1,0 % presentó la mayor rigidez estimada entre las condiciones evaluadas, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3.

Módulo estático de elasticidad estimado según la dosificación de fibra de coco / Estimated static modulus of elasticity according to coconut fiber dosage



Relación entre resistencia a la compresión y módulo estimado

Las variaciones del módulo estimado siguieron la misma dirección que los cambios de la resistencia a la compresión, aunque con magnitudes menores. La mezcla con 1,0 % incrementó la resistencia en 3,99 % y el módulo estimado en 1,98 %. La dosificación de 0,5 % produjo aumentos de 1,97 % y 0,98 %, respectivamente. En la mezcla con 1,5 %, la resistencia disminuyó 3,88 % y el módulo estimado se redujo 1,96 %.

Esta diferencia de magnitudes respondió a la relación de raíz cuadrada utilizada en la estimación. En consecuencia, las variaciones porcentuales del módulo fueron aproximadamente la mitad de las variaciones registradas en la resistencia. Los resultados mostraron un desempeño ascendente hasta la dosificación de 1,0 %, seguido de una

reducción cuando el contenido de fibra aumentó a 1,5 %.

Discusión

Los resultados mostraron que la incorporación de fibra de coco tratada produjo una respuesta mecánica no lineal. Las mezclas con 0,5 % y 1,0 % superaron la resistencia de la mezcla patrón, mientras que la dosificación de 1,5 % redujo el desempeño a los 28 días. Este comportamiento confirma que el efecto de la fibra no depende únicamente de su presencia, sino también de la cantidad incorporada y de su interacción con la matriz cementicia. Ahmad et al. (2020) sostienen que la longitud y el contenido de fibra actúan de manera conjunta sobre las propiedades del hormigón. Desde una perspectiva más amplia, Ahmad et al. (2022) y Martinelli et al. (2023) señalan que los beneficios mecánicos de la fibra de coco

están condicionados por su geometría, dispersión, absorción de agua, adherencia y compatibilidad con la pasta de cemento. Los resultados obtenidos coinciden con esa interpretación, pues el aumento inicial de la resistencia se interrumpió cuando la dosificación alcanzó 1,5 %.

La reducción del asentamiento, desde 85 mm en la mezcla patrón hasta 75 mm en la mezcla con 1,5 %, evidenció que la fibra modificó progresivamente la consistencia del hormigón fresco. Al mantenerse constante la relación agua/cemento, esta variación puede asociarse con la absorción de humedad por parte de la fibra, el incremento de la superficie interna y la restricción que sus filamentos ejercen sobre el movimiento de los agregados. La pérdida de fluidez no impidió la elaboración de las probetas, pero indicó una menor facilidad de colocación y compactación a medida que aumentó la dosificación. Shah, Amir, Ali y El Ouni (2022) reconocieron este inconveniente y emplearon un plastificante para conservar la trabajabilidad en mezclas con contenidos de fibra entre 1 % y 3 %. La decisión metodológica de esos autores demuestra que el control de la consistencia constituye una condición necesaria cuando se pretende aumentar la proporción de fibra sin alterar la calidad de compactación.

La resistencia a la compresión alcanzó su mayor valor con 1,0 % de fibra, dosificación que registró 22,08 MPa a los 28 días y superó en 3,99 % a la mezcla patrón. El incremento fue moderado, pero se mantuvo durante las tres edades de curado, lo que indica que el mejor desempeño no correspondió a una variación aislada del ensayo final. Una posible explicación se encuentra en la capacidad de las fibras adecuadamente dispersas para restringir el crecimiento de microfisuras y conservar la continuidad interna de la matriz antes de la rotura. Ahmad et al. (2020) atribuyen parte de la respuesta mecánica del hormigón reforzado a la relación entre longitud, contenido y distribución de la fibra. Shah et

al. (2022), por su parte, obtuvieron mejoras de resistencia con proporciones de 1 % y 2 %, aunque su hormigón incorporó agregados reciclados y un aditivo plastificante. La coincidencia entre ambos estudios y los resultados actuales radica en la existencia de un intervalo favorable de dosificación; la diferencia en el porcentaje óptimo muestra que ese intervalo no puede trasladarse de una mezcla a otra sin considerar los materiales, la longitud de fibra, la relación agua/cemento y el procedimiento de mezclado.

El descenso registrado con 1,5 % de fibra respalda la existencia de un límite a partir del cual el efecto de refuerzo deja de compensar las alteraciones introducidas en el hormigón fresco. Esta mezcla presentó el menor asentamiento y una resistencia de 20,40 MPa a los 28 días, equivalente al 99,08 % de la resistencia especificada. La combinación de menor fluidez, mayor fricción interna y dificultad para distribuir uniformemente las fibras pudo favorecer la formación de vacíos o concentraciones localizadas. Ahmad et al. (2022) y Martinelli et al. (2023) describen esta competencia entre dos mecanismos: por una parte, la fibra puede limitar la apertura de fisuras; por otra, un contenido elevado puede aumentar la porosidad y debilitar la zona de transición. En el presente estudio no se realizaron análisis microscópicos ni ensayos directos de porosidad, de modo que esta explicación debe interpretarse como un mecanismo probable y no como una comprobación microestructural.

La dispersión reducida entre las dos probetas de cada condición aporta consistencia a las diferencias observadas, aunque el número de réplicas limita el alcance estadístico de la comparación. Los coeficientes de variación permanecieron entre 0,78 % y 2,56 %, valores que reflejan uniformidad en la fabricación y el ensayo de los cilindros. Sin embargo, dos especímenes por combinación de dosificación y edad no permiten demostrar que las diferencias entre mezclas sean estadísticamente significativas. En consecuencia, el incremento de 3,99 %

correspondiente a la dosificación de 1,0 % debe presentarse como una mejora experimental dentro de las condiciones estudiadas, sin generalizarla como una superioridad comprobada para otras poblaciones de hormigón.

El tratamiento previo de la fibra pudo contribuir a su integración con la pasta cementicia. La inmersión en lechada de cal, el lavado y el secado buscaron retirar impurezas y acondicionar la superficie antes del mezclado. Olo-nade y Savastano Junior (2023) estudiaron fibras sin tratar y fibras tratadas con hidróxido de sodio, evaluando su respuesta después de la exposición a una solución representativa de los poros del cemento. Sus resultados muestran que la condición superficial y el medio alcalino modifican las propiedades físicas y mecánicas de la fibra, aunque también advierten que se requieren periodos de evaluación más prolongados para establecer conclusiones generales sobre durabilidad. El procedimiento de esos autores no es equivalente al tratamiento con lechada de cal utilizado en esta investigación; por ello, su trabajo respalda la importancia del acondicionamiento, pero no demuestra que la concentración de 10 g/L y el tiempo de 48 horas constituyan una solución óptima.

Martinelli et al. (2024) plantean que las condiciones de secado también pueden alterar las propiedades de la fibra de coco. Esta observación resulta pertinente, ya que las fibras empleadas se secaron al ambiente durante aproximadamente 24 horas antes de su incorporación. La humedad remanente pudo influir en la cantidad de agua efectiva disponible para la hidratación y en la adherencia con la matriz. No obstante, el estudio no comparó fibras tratadas y no tratadas ni controló diferentes condiciones de secado. En consecuencia, no es posible separar cuantitativamente el efecto del tratamiento del efecto asociado a la dosificación. Una fase experimental posterior deberá incluir una mezcla con fibra sin tratamiento y mediciones de humedad, absorción y masa constante antes del mezclado.

El módulo estático de elasticidad determinado directamente en los siete cilindros de la mezcla patrón presentó un promedio de 13,971 GPa y un coeficiente de variación de 0,75 %. La baja dispersión indica estabilidad en los registros de esfuerzo y deformación utilizados para calibrar la relación local. Ali, Liu, Sou y Chouw (2012) incluyeron el módulo estático entre las propiedades mecánicas evaluadas experimentalmente en hormigones con fibra de coco, junto con la resistencia, la tenacidad, la tracción indirecta y el módulo de rotura. Su enfoque resulta importante porque considera la rigidez como una respuesta independiente y no como una consecuencia automática de la resistencia a la compresión. Esta distinción adquiere especial relevancia en hormigones con fibras naturales, donde la menor rigidez del refuerzo orgánico y los cambios en la porosidad pueden modificar la deformabilidad del compuesto.

Los módulos correspondientes a las mezclas con fibra se estimaron mediante la expresión calibrada con el hormigón patrón. La mezcla con 1,0 % alcanzó el mayor valor estimado, 14,26 GPa, seguida por la dosificación de 0,5 % con 14,12 GPa. La mezcla con 1,5 % descendió a 13,71 GPa. Aunque esta evolución coincide con la observada en la resistencia a la compresión, no constituye una confirmación experimental independiente de que la fibra incrementó o redujo la rigidez. La correspondencia era matemáticamente esperable, puesto que el módulo fue calculado como una función de la raíz cuadrada de la resistencia. Por esta razón, los incrementos de 0,98 % y 1,98 % y la reducción de 1,96 % describen la respuesta del modelo estimativo, pero no sustituyen ensayos directos de deformación en cada dosificación.

La relación empleada posee utilidad como aproximación local y permite comparar las mezclas bajo un criterio uniforme. Sin embargo, su aplicación debe restringirse a materiales, edades y resistencias cercanas a las utilizadas durante la calibración. Khan

y Ali (2019) registraron curvas esfuerzo-deformación en hormigones que combinaron fibra de coco con humo de sílice y ceniza volante, lo que evidencia que las modificaciones de la matriz pueden alterar simultáneamente la resistencia, la deformación y la tenacidad. Esa evidencia refuerza la necesidad de medir directamente el módulo cuando cambia la composición del hormigón, pues una correlación obtenida para la mezcla patrón puede no representar por completo la respuesta deformacional de una matriz con fibras.

Desde la perspectiva ambiental, los resultados demuestran la posibilidad de incorporar una cantidad limitada de residuo fibroso sin reducir la resistencia especificada, siempre que la dosificación se mantenga dentro del intervalo favorable. No obstante, el carácter sostenible de la mezcla debe expresarse con prudencia. La investigación no cuantificó emisiones, energía incorporada, transporte, vida útil ni sustitución de cemento. Shah et al. (2022) reportaron reducciones de emisiones en mezclas que combinaron fibra de coco con agregados reciclados, pero ese resultado no puede transferirse directamente al hormigón evaluado, porque en este caso la fibra se incorporó como adición y las cantidades de cemento y agregados permanecieron constantes. El aporte ambiental comprobable se limita al aprovechamiento de un residuo agroindustrial; la magnitud de cualquier beneficio deberá determinarse mediante un análisis de ciclo de vida o una evaluación comparativa de impactos.

En conjunto, los resultados respaldan el uso de dosificaciones moderadas de fibra de coco tratada. La proporción de 1,0 % ofreció el mejor equilibrio entre trabajabilidad, resistencia a la compresión y módulo estimado, mientras que el contenido de 1,5 % mostró que aumentar la cantidad de fibra no garantiza una mejora mecánica. El principal aporte del estudio reside en integrar la resistencia experimental con una calibración local del módulo estático de elasticidad. Aun así, la interpretación de la

rigidez permanece limitada por la ausencia de ensayos ASTM C469/C469M en las mezclas modificadas. Para confirmar la influencia de la dosificación sobre esta propiedad será necesario ensayar directamente cada mezcla, incrementar el número de réplicas y complementar el análisis con mediciones de porosidad, absorción y observación de la interfaz fibra-matriz.

Conclusiones

La fibra de coco tratada produce una respuesta no lineal en el hormigón. Las dosificaciones de 0,5 % y 1,0 % incrementan la resistencia a la compresión respecto a la mezcla patrón, mientras que el contenido de 1,5 % reduce el desempeño mecánico. La proporción de 1,0 % alcanza el mayor valor a los 28 días, con 22,08 MPa, equivalente a un incremento de 3,99 % frente al hormigón sin fibra.

El aumento de la dosificación disminuye progresivamente la trabajabilidad, pues el asentamiento pasa de 85 mm en la mezcla patrón a 75 mm con 1,5 % de fibra. Este comportamiento evidencia que los contenidos elevados pueden dificultar la distribución de las fibras y la compactación del hormigón, lo que coincide con la reducción de resistencia observada en la dosificación más alta.

El módulo estático de elasticidad medido en la mezcla patrón alcanza un promedio de 13,971 GPa y permite obtener un factor experimental de 3035,67 MPa^{0.5}. Mediante la correlación calibrada, la dosificación de 1,0 % presenta el mayor módulo estimado, con 14,26 GPa, mientras que el contenido de 1,5 % disminuye a 13,71 GPa. Estos valores representan estimaciones derivadas de la resistencia y requieren confirmación mediante ensayos directos de esfuerzo-deformación en las mezclas con fibra.

Bibliografía

- Ahmad, J., Majdi, A., Al-Fakih, A., Deifalla, A. F., Althoey, F., El Ouni, M. H., y El-Shorbagy, M. A. (2022). Mechanical and durability performance of coconut fiber reinforced concrete: A state-of-the-art review. *Materials*, 15(10), 3601. <https://doi.org/10.3390/ma15103601>
- Ahmad, J., Zaid, O., Siddique, M. S., Aslam, F., Alabduljabbar, H., y Khedher, K. M. (2021). Mechanical and durability characteristics of sustainable coconut fibers reinforced concrete with incorporation of marble powder. *Materials Research Express*, 8(7), 075505. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac10d3>
- Ahmad, W., Farooq, S. H., Usman, M., Khan, M., Ahmad, A., Aslam, F., Al Yousef, R., Alabduljabbar, H., y Sufian, M. (2020). Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete. *Materials*, 13(5), 1075. <https://doi.org/10.3390/ma13051075>
- Ali, M., Liu, A., Sou, H., y Chouw, N. (2012). Mechanical and dynamic properties of coconut fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 30, 814–825. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.068>
- American Concrete Institute. (1991). Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1-91, re-approved 2009). Farmington Hills, MI: Autor.
- ASTM International. (2020). Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete (ASTM C143/C143M-20). West Conshohocken, PA: Autor. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20
- ASTM International. (2022). Standard test method for static modulus of elasticity and Poisson's ratio of concrete in compression (ASTM C469/C469M-22). West Conshohocken, PA: Autor. https://doi.org/10.1520/C0469_C0469M-22
- ASTM International. (2023). Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens (ASTM C39/C39M-23). West Conshohocken, PA: Autor. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-23
- Bediako, M., Ametefe, T. K., Asante, N., y Adumatta, S. (2025). Incorporation of natural coconut fibers in concrete for sustainable construction: Mechanical and durability behavior. *Case Studies in Construction Materials*, 22, e04867. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04867>
- Gu, M., Ahmad, W., Alaboud, T. M., Zia, A., Akmal, U., Awad, Y. A., y Alabduljabbar, H. (2022). Scientometric analysis and research mapping knowledge of coconut fibers in concrete. *Materials*, 15(16), 5639. <https://doi.org/10.3390/ma15165639>
- Guruswamy, K. P., Thambiannan, S., Anthonysamy, A., Jalgaonkar, K., Dukare, A. S., Pandiselvam, R., y Jha, N. (2024). Coir fibre-reinforced concrete for enhanced compressive strength and sustainability in construction applications. *Heliyon*, 10(21), e39773. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39773>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., y Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento (NTE INEN 1578:2010). Quito, Ecuador: Autor.
- Khan, M., y Ali, M. (2019). Improvement in concrete behavior with fly ash, silica-fume and coconut fibres. *Construction and Building Materials*, 203, 174–187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.103>
- Martinelli, F. R. B., Pariz, M. G., de Andrade, R., Ferreira, S. R., Marques, F. A., Monteiro, S. N., y de Azevedo, A. R. G. (2024). Influence of drying temperature on coconut-fibers. *Scientific Reports*, 14, 6421. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56596-z>
- Martinelli, F. R. B., Ribeiro, F. R. C., Marvila, M. T., Monteiro, S. N., Garcia Filho, F. C., y de Azevedo, A. R. G. (2023). A review of the use of coconut fiber in cement composites. *Polymers*, 15(5), 1309. <https://doi.org/10.3390/polym15051309>
- Miller, S. A., Horvath, A., y Monteiro, P. J. M. (2018). Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, 1, 69–76. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0009-5>
- Olonade, K. A., y Savastano Junior, H. (2023). Performance evaluation of treated coconut fibre in cementitious system. *SN Applied Sciences*, 5, 218. <https://doi.org/10.1007/s42452-023-05444-2>

- Scrivener, K. L., John, V. M., y Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Sekar, A., y Kandasamy, G. (2018). Optimization of coconut fiber in coconut shell concrete and its mechanical and bond properties. *Materials*, 11(9), 1726. <https://doi.org/10.3390/ma11091726>
- Shah, S. H. A., Amir, M. T., Ali, B., y El Ouni, M. H. (2022). Mechanical performance and environmental impact of normal strength concrete incorporating various levels of coconut fiber and recycled aggregates. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(55), 83636–83651. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21608-w>
- Wang, W., y Chouw, N. (2017). The behaviour of coconut fibre reinforced concrete under impact loading. *Construction and Building Materials*, 134, 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.092>

Cómo citar: Parrales Pinargote, G. A., & Baque Campozano, B. P. . (2026). Influencia de la fibra de coco como adición sostenible en el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión del hormigón estructural. *UNESUM - Ciencias. Revista Científica Multidisciplinaria*, 10(3), 4–21. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v10.n3.2026.4-21>