

Systematic Literature on the Improvement of the Mechanical Properties of Concrete with Fibers of Artificial-Natural Origin

Revisión sistemática de la literatura sobre la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón con fibras de origen artificial-natural

Yamalit Itamar Olivera Pérez^{ID*1}, **Sandro Piero Guevara Saravia**^{ID1},
Sócrates Pedro Muñoz Pérez^{ID*1}

¹Universidad Señor de Sipán (Chiclayo, Perú).

*Correspondence e-mail: msocrates@crece.uss.edu.pe

Recibido: 29/06/2021. Modificado: 20/09/2021. Aceptado: 15/11/2021.

Abstract

Context: Ince structures are nowadays being affected due to the environment in which they are located, as well as by strong seismic movements, leading them in some cases to collapse.

Method: A search of scientific articles for the period 2014-2021 was carried out in different databases. 56 research works that applied fibers were collected. To this effect, keywords such as *hormigón reforzado*, reinforced concrete, and mechanical properties of concrete were used.

Results: The mechanical characteristics of concrete which should be prioritized for improvement should be compression resistance capacity, tensile strength, modulus of elasticity, durability properties such as resistance to chemical attack, shrinkage properties, permeability properties, and physical properties such as drying time, unit weight, erosion, and absorption.

Conclusions: Among the artificial fibers most used by researchers, metallic fibers stand out. In the same way, among the natural fibers, banana, rice husk, and sugar cane bagasse stand out.

Keywords: addition of fibers to concrete, recycled concrete, reinforced concrete

Language: Spanish

Open access



Cite as: Y. I. Olivera Pérez, S. P. Guevara Saravia, S. P. Muñoz Pérez. "Análisis de estructuras de carga de dos tormentas eléctricas registradas por la red Lightning Mapping Array en el Magdalena Medio colombiano". *Ing.*, vol. 27, no. 2, 2022. e18207. <https://doi.org/10.14483/23448393.18207>

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Resumen

Contexto: Toda vez que hoy en día las estructuras están siendo afectadas debido al medio ambiente en el que se ubican, así como por fuertes movimientos sísmicos, llevándolas en algunos casos hasta el colapso.

Método: Se realizó una búsqueda de artículos científicos para el período 2014-2021 en diferentes bases de datos. Se recopilaron 56 investigaciones que emplearon fibras. Para ello se utilizaron palabras claves como: hormigón reforzado, *reinforced concrete* y propiedades mecánicas del hormigón.

Resultados: Las características mecánicas del hormigón que debe priorizarse mejorar deben ser la capacidad de resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad, propiedades de durabilidad como la resistencia al ataque químico, las propiedades de contracción, las propiedades de permeabilidad y propiedades físicas como el tiempo de secado, el peso unitario, la erosión y la absorción.

Conclusiones: Entre las fibras artificiales más utilizadas por los investigadores destacan las fibras metálicas. Del mismo modo, dentro de las fibras naturales destacan la de banano, la cáscara de arroz y la de bagazo de caña de azúcar.

Palabras clave: adición de fibras al concreto, hormigón reciclado, hormigón reforzado

Idioma: Español

1. Introducción

Un desafío del siglo XXI es lograr la compatibilidad entre la resistencia requerida y el uso de materiales de construcción ligeros. Las fibras artificiales y naturales se utilizan hoy en día como potenciadores en el campo de la ingeniería, contribuyendo en la mejora de las características mecánicas de los elementos estructurales como la resistencia a la tracción y al impacto [1]. Así por ejemplo, mejorar el rendimiento de flexión y cortante de vigas de hormigón reforzado juega un papel vital en el control del comportamiento sísmico de las estructuras de concreto [2]. Actuales falencias de elementos de gran envergadura han generado la utilización de fibras con el fin de reforzar el desempeño del hormigón [3]. El concreto convencional es deficiente con respecto a sus propiedades dinámicas, sobre todo cuando es sometido al impacto, e insensible respecto a la velocidad de carga [4]. Hormigón reforzado con fibra de acero, por ejemplo, es un material prometedor para muchas aplicaciones en las que se requieren respuestas con respecto a la tracción y a la compresión, un pequeño espesor y una gran suficiencia para absorber energía [5]. Por otro lado, el hormigón reforzado con fibra posee una gran capacidad de resistencia a la flexión, una ductilidad mejorada y una gran suficiencia para absorber energía, más que el hormigón convencional frente a cargas dinámicas [6]. Cuando el hormigón se refuerza con fibras dispersas al azar evita que se formen microgrietas que se ensanchen [7]. La combinación de varios tipos de fibras da como resultado la formación de compuestos híbridos [8], en los que un tipo de fibra podría mejorar las propiedades del hormigón fresco y evitar la formación de grietas por retracción temprana, o también podría contribuir a la mejora de la resistencia y la durabilidad del hormigón endurecido [9]. Entre las peculiaridades más sobresalientes del hormigón, que suma en sus características mecánicas, está su durabilidad, relacionada con el tiempo en función de las estructuras comprometidas a circunstancias o entornos; por lo que esta propiedad describe los campos de aplicación de nuevos componentes cementantes [10].

Nuevas tecnologías constructivas y materiales son aplicados cotidianamente con más frecuencia en la búsqueda de mejoras de calidad, considerando siempre la parte ecológica y la económica en la construcción [11]–[13], siendo prueba de ello la obtención de hormigón de buena calidad hasta con agua tratada [14]. Últimamente se ha incrementado el uso de fibras naturales como refuerzo en materiales de construcción, toda vez que tienen muchas características favorables tales como ser rígidas, livianas, económicas y ecológicas [15]; se han obtenido resultados que presentaron buenas correlaciones entre los resultados experimentales y lo previsto [16]. La utilización de hormigón elaborado con materiales reciclados, en general, es una buena alternativa para poder reducir considerablemente los recursos cuando se fabrican los materiales comúnmente utilizados como cemento y acero [17]. Así, por ejemplo, la creciente cantidad de llantas recicladas y desechos de construcción que se acumulan en los vertederos crea una gran preocupación para la estabilidad ambiental; investigadores y autoridades buscan formas de reducir y reutilizar estos materiales de desecho, promoviendo una práctica de construcción sostenible, incorporando por ejemplo fibras de caucho reciclado, derivado de las llantas, y agregado grueso reciclado para la producción de concreto [18]–[20].

En el litoral peruano también se acumula gran cantidad de residuos plásticos que podrían ser reutilizados como fibras para mejorar las características mecánicas del concreto como resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y propiedades de durabilidad como la resistencia al ataque químico [21], entre otros [22]. Hacer uso de fibras naturales comprende a desechos orgánicos como la fibra de banano [23] o plumas de aves que comúnmente son incinerados. La importancia que además tiene reutilizar estas fibras es que requiere de mano de obra [24] y, por tanto, indirectamente genera puestos de trabajo. Todos esos nuevos materiales reciclados deberían ser más explotados y estudiados por la industria y la ingeniería [25], [26].

Nuevos materiales son eventualmente evaluados en la industria de la construcción con el fin de encontrar mejoras en cada elemento estructural, buscando también la viabilidad y la factibilidad entre costo y calidad, es por eso que la mezcla de hormigón y fibras es un material ya conocido, pero es más usado con fines no estructurales como pavimentos o también para comportamientos frente al fuego, aislamiento térmico; es por eso que se busca evaluar una mezcla de hormigón adicionando fibras, esta vez para usos estructurales [27].

El objetivo de la presente investigación fue realizar una revisión literaria de estudios que estuvieron enfocados en optimizar las propiedades mecánicas del hormigón, adicionando fibras artificiales y naturales. Para ello se ejecutó una búsqueda bibliográfica de artículos científicos y de revisión, tal como se detalla en la metodología, presentándose además en los resultados un extracto de los mismos. Finalmente se presentan las conclusiones y las referencias citadas en el presente documento.

En suma, mejorar la sustentabilidad de las estructuras de hormigón a partir del uso de fibras artificiales y naturales es vital, toda vez que se busca disminuir los costos para construir, reducir el daño al medio ambiente (huella de CO₂ y consumo de energía) [28]–[31], optimizar el tiempo de vida útil y prevenir daños a futuro frente a los problemas recurrentes de las construcciones.

2. Metodología

Como parte de la revisión literaria se realizaron dos tablas, en la primera se detallan los términos clave que se emplearon en español y en inglés para la búsqueda, tales como: concreto reforzado (reinforced concrete), propiedades mecánicas del concreto (mechanical properties of concrete), adición de fibras al concreto (addition of fibers to concrete), concreto reciclado (recycled concrete) y mejoramiento del concreto (concrete improvement); tal y como se muestra en la Tabla I. Posteriormente se aplicaron filtros de búsqueda, tales como: “Texto completo”, “Revistas”, “Ingeniería”, “Ciencia de los materiales”, “Concreto” y “Fibras”, de modo que se realizó una búsqueda más puntual, a la vez que se redujo la cantidad de artículos referenciados. En la Tabla II se detalla la distribución de artículos citados en función del año de publicación y la base de datos, se hizo una búsqueda bibliográfica de artículos científicos para el período 2014-2021 en diferentes bases de datos, a saber: Scopus, EBSCOhost, ProQuest, Scielo, ScienceDirect y Redalyc, así como también se buscaron tres artículos de la revista “Ingeniería” de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En total se recopilaron 56 investigaciones relacionadas con el uso de fibras para la optimización de las propiedades mecánicas del concreto, tal y como se muestra en la Tabla II.

Tabla I. Resultados de la búsqueda con filtros

Base de datos	Año de publicación	Palabras clave	Resultados de búsqueda	Filtros aplicados	Resultados de artículos después de aplicar filtros	Artículos seleccionados
Scopus	2014-2021	Reinforced concrete with natural fibers	973	“Artículos” “Ingeniería”	475	21
EBSCOhost		Mechanical properties of concrete	4.276	“Texto Completo” “Reinforced Concrete”	79	15
ProQuest		Concrete adding artificial fibers	3.686	“Texto Completo” “Revistas científicas” “Concrete”	187	6
Scielo		Recycled concrete	95	“Ingeniería”	87	9
ScienceDirect		Concrete improvement adding fibers	11.718	“Engineering” “Research articles” “Cement and concrete composites”	317	5

3. Resultados

En el marco de utilizar fibras artificiales y naturales para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, se muestra un resumen de las principales investigaciones que emplearon dichas fibras

para mejorar las dosificaciones de concreto, las mismas que se presentan con otras complementarias en las Tablas III, IV y V.

Tabla II. Distribución de artículos referenciados en función del año de publicación y la base de datos

Año/Base de datos	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	Total
Scopus	–	–	–	–	3	3	8	7	21
EBSCOhost	2	2	–	–	4	2	5	–	15
ProQuest	–	1	1	2	1	–	1	–	6
Scielo	1	1	1	1	1	2	2	–	9
ScienceDirect	–	1	1	1	1	–	–	1	5
Total	3	4	3	4	10	7	16	7	56

3.1. Aplicación de fibras artificiales para la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

En el marco de definir ensayos para el estudio de las propiedades del hormigón, Alberti *et al.* [32] propusieron un enfoque metodológico para la caracterización del concreto armado con fibras estructurales mediante procedimientos de ensayos mecánicos como ensayos de flexión de probetas con ranuras prismáticas, ensayos de tracción y ensayos de corte puro. En esa línea, Awoyera *et al.* [33] estudiaron propiedades como el estado fresco y la absorción de agua de un concreto elaborado con desechos de baldosas cerámicas como áridos finos y botellas de tereftalato de polietileno (PET) como fibras. Los residuos cerámicos (RC) los emplearon como reemplazo del agregado fino en proporciones del 50 % y 100 % (en peso del agregado fino), y las fibras plásticas las adicionaron en proporciones de 1,5 % y 2,5 % (en peso de mezcla de hormigón). Sus resultados obtenidos indicaron que la incorporación de fibras plásticas y residuos cerámicos resultó en una disminución del valor de asentamiento; por tanto, una reducción en la trabajabilidad del concreto fresco. La muestra de hormigón con un 100 % de áridos cerámicos finos y un 2,5 % de fibras plásticas alcanzó la mayor capacidad de resistencia a la compresión, así como la capacidad de resistencia a la tracción incrementó con un mayor tiempo de curado. En general, la resistencia a la tracción del hormigón se incrementó hasta en un 45 % mediante la inclusión de un 100 % de agregados de cerámica (como reemplazo en peso del agregado fino) y un 2,5 % de fibras plásticas (en peso de mezcla de hormigón); no obstante, la absorción de agua del hormigón disminuyó al aumentar el contenido de cerámica y fibra plástica.

En esa misma línea, Lima *et al.* [34] analizaron las características físicas y mecánicas de elementos de hormigón prensado con incorporación de tereftalato de polietileno (PET) reciclado. Para ello realizaron un análisis experimental reemplazando, en volumen, agregado fino (piedra fina triturada) por fracciones de PET triturado en contenidos de 15 %, 30 % y 45 %. En función a sus resultados, concluyeron que el contenido que presentó mejores valores fue el que tuvo 15 % de PET, debido a que su resistencia a la compresión mostró un valor superior a los demás, destacando una absorción aún menor, resultado de su mayor homogeneidad y mejor envoltura del compuesto obtenido.

Entre las fibras artificiales más utilizadas por los investigadores destacan las fibras metálicas; en esa línea, Generosi *et al.* [35] analizaron el desempeño a tracción de un hormigón de ultra alto rendimiento reforzado con fibras de acero (UHPFRC, por sus iniciales en inglés, *ultra high performance fiber reinforced concrete*), a partir de ensayos de tracción directa en muestras de hueso de perro, utilizando para ello un sistema con condiciones de contorno rotativas, así como pruebas para el control de desplazamientos. Del mismo modo, emplearon la correlación de imágenes digitales (CID) para medir desplazamientos, deformaciones, número y ancho de grietas, e investigaron el efecto de las fibras de acero (tipo gancho con un diámetro de 0,38 mm y una longitud de 30 mm), sobre el comportamiento de tracción del UHPFRC, variando la cantidad de fibras desde 0 % hasta 2,6 % en volumen. Así obtuvieron que una parte de volumen de la fibra influyó significativamente en la capacidad de resistencia a la tracción del material, la deformación en la resistencia máxima y en el desempeño posterior al agrietamiento.

Por su parte, Karimipour y Ghalehnovi [2] compararon el producto de las fibras de acero y polipropileno sobre su comportamiento ante la flexión de vigas de hormigón con áridos reciclados. Inicialmente estudiaron el desempeño en flexión de vigas de hormigón fabricadas con agregado grueso reciclado (AGR), fibras de acero (FA) y fibras de polipropileno (FPP). Ensayaron un total de 54 vigas de 150 mm de ancho, 200 mm de alto y 1500 mm de longitud, con diferente distanciamiento entre armaduras transversales. Utilizaron el AGR de la demolición de un edificio como reemplazo del agregado grueso natural al 0 %, 50 % y 100 % (en términos de masa). Para mejorar el comportamiento en flexión de las vigas, adicionaron FA y FPP al 0 %, 1 % y 2 % (en términos de volumen), y las muestras se probaron bajo una configuración de flexión. Con estos ensayos, midieron la capacidad máxima de flexión, la deformación máxima en la mitad de la luz de las vigas, la ductilidad y la rigidez de las probetas; encontrándose que la influencia de las fibras de polipropileno (FPP) mejoró significativamente la capacidad de flexión de las vigas, siendo mayor que la obtenida con fibras de acero (FA); no obstante, la adición de fibras de acero (FA) sobre la deformación fue más significativa.

Tawfeeq *et al.* [36] analizaron la flexión de vigas de hormigón conformada por áridos como escoria granulada de alto horno (GBFS, del inglés *granulated blast furnace slag*) en reemplazo del cemento, agregados de bloques reciclados (ABR) en reemplazo del agregado grueso ordinario, fibra de acero, fibras de polipropileno y grapadoras. Diseñaron y ensayaron 10 vigas de hormigón armado de sección transversal de 90 mm de ancho, 150 mm de alto y 1.000 mm de longitud. Para ello prepararon un total de 10 mezclas con diferentes sustitutos (en términos de peso), a saber: ABR (0 %, 25 %, 50 % y 100 %), GBFS (0 %, 25 %, 50 % y 70 %), fibras de acero (0 %, 0,5 %, 1 % y 1,5 %); 0,5 % de fibra de acero de grapadora y 0,5 % de fibras de polipropileno (en términos de volumen). Para cada mezcla de hormigón analizaron la capacidad de resistencia a la compresión y la capacidad de resistencia a la tracción, los mismos que se redujeron al usar GBFS, ABR y fibras; así la reducción extrema de la capacidad de resistencia a la compresión y la capacidad de resistencia a la tracción por flexión fueron del 50 % y 55 %, respectivamente, para el 70 % de GBFS, el 25 % de ABR y el 0,5 % de fibra de acero. La menor disminución en la capacidad de resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción por flexión fue para una mezcla de 25 % de GBFS, 25 % de ABR y 0,5 % de fibra de acero con clavijas de grapadora. El rol de GBFS y ABR fue más eficiente en el desempeño de las vigas de hormigón armado, de ahí que hubo una mejora en la capacidad de flexión para todas las vigas que alcanzaron el 27,7 %, más aún cuando se hizo mediante el uso del

25 % de GBFS, el 25 % de ABR y el 1,5 % de fibra de acero. En suma, de acuerdo con los ensayos realizados y los resultados obtenidos, la utilización de GBFS, ABR y fibras hizo que las vigas de hormigón armado fueran más dúctiles, a partir de la mejora de sus propiedades mecánicas y de durabilidad.

En la misma línea, Carrillo *et al.* [37] realizaron una investigación cuyo objetivo fue determinar la cantidad necesaria de fibras de acero para alcanzar un rendimiento en flexión parigual que el de una losa de concreto en un terreno reforzado con malla electrosoldada, y con la cantidad de acero necesaria por contracción y temperatura. Para ello ensayaron en flexión 10 losas cuadradas cuyo lado fue de 600 mm, 100 mm de espesor y variado tipo de refuerzo, empezando por losas de concreto simple, losas con variadas proporciones de fibra de acero, a saber: 5,9 y 18 kg/m³, losas con malla electrosoldada de 5 mm de diámetro y espacios cuadrados de 150 mm x 150 mm. Emplearon curvas “carga-deflexión” para estimar la capacidad de absorción de energía vinculada a variados resultados para la flecha en el centro de la luz de la losa. Asimismo, realizaron un análisis de regresión lineal, cuyos resultados se emplearon para estimar la cantidad proporcional de fibras de acero por sustituir, y de acuerdo con un valor específico de deflexión, determinar el esfuerzo normal de la losa de concreto.

Carrillo *et al.* [38] evaluaron la reacción del ion de cloruro en la compresión del hormigón reforzado con fibras de acero RC-65/35-BN (CRFA), para lo cual ensayaron 54 muestras de CRFA en forma de probetas, identificadas con una relación longitud/diámetro = 65, con combinaciones de 27,50 y 60 kg/m³. Estudiaron la influencia de dos lugares corrosivos en los que ensayaron 18 probetas que fueron expuestas a la acción de un medio acuoso, 18 en ion cloruro (Cl-) al 3,5 % y 18 se mantuvieron sin alterar, durante 60 días. Así evidenciaron que la corrosión afectó en un 2 % la resistencia a la compresión, y hubo un incremento del 13 % en la relación de Poisson del CFRA y un descenso del 6 % del módulo de elasticidad. En suma, ambientes corrosivos a corto plazo no alteraron considerablemente las características mecánicas del hormigón añadiendo fibras de acero (CRFA); sin embargo, los autores consideran que a largo plazo sí se verían afectadas por la corrosión propiedades del hormigón como la resistencia a la compresión.

Asimismo, Akbari y Abed [39], empleando fibras de acero y vidrio, evaluaron las propiedades de hormigón, al cual adicionaron 0,3 %, 0,6 % y 0,9 % en volumen de fracción de acero y fibras de vidrio, combinadas con concreto con relaciones de agua/cemento (a/c) de 0,35 y 0,45 respectivamente. Para cada relación de agua/cemento prepararon 21 muestras de las que analizaron su resistencia a la compresión, 14 muestras cilíndricas de las que evaluaron su resistencia a la tracción y 14 muestras de las que analizaron su resistencia a la flexión. Sus productos experimentales demostraron que la adición de 0,3 % a 0,9 % de fibras de acero al concreto sumó constantemente la capacidad de resistencia a la flexión, a la compresión y a la tensión, respecto al concreto simple; sin embargo, el aumento de fibras de vidrio solo entre el 0,3 % y 0,6 % aumentó la resistencia a la compresión. En suma, sus resultados demostraron que el mejor rango para mejorar la resistencia del hormigón con fibra de acero fue el de 0,3 % a 0,9 %; mientras que para la fibra de vidrio fue de 0,3 % a 0,6 % por fracción de volumen de fibra.

Por su parte, Ortega *et al.* [40] evaluaron la viabilidad de hacer un hormigón reforzado con fibras y de muy buena trabajabilidad, así mismo propusieron utilizar escoria de acero de horno de

arco (EAF) y escoria de alto horno granulada (GGBFS); realizaron pruebas creando mezclas de hormigón reforzadas con 0.5 % (volumen de fibras) tanto en su estado fresco como en estado endurecido, y finalmente los resultados revelaron que al diseñar este hormigón con fibra artificial brindó resistencias adecuadas, así como mejor ductilidad, tenacidad, entre otras propiedades. También demostraron la excelente adherencia entre las fibras y el material cementoso; es decir, el uso de este hormigón sería viable y factible desde el punto de vista mecánico.

Otras de las fibras artificiales utilizadas por los autores referenciados en el presente artículo de revisión para la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón son las fibras de caucho; al respecto, Shahjalal *et al.* [41] estudiaron la respuesta a la flexión de vigas de concreto reforzado con fibras de caucho reciclado (CR), combinado con agregado grueso reciclado (AGR) y fibras de polipropileno (FPP). Para ello ensayaron 14 vigas de concreto reforzado, cuyas medidas fueron 150 mm de ancho, 200 mm de alto y 1.500 mm de largo. Diseñaron varias combinaciones conteniendo caucho granulado en 5 % y 10 % (en volumen, como reemplazo de la arena), fibras de acero en 0,59 % y 1,60 % (en peso de la mezcla), agregado grueso reciclado en 30 % (en volumen de la mezcla) y fibra de polipropileno en 0,5 % (en peso de la mezcla). Sus resultados evidenciaron una mejora de las características mecánicas del concreto a corto y largo plazo tras la introducción de fibra de caucho reciclado y fibras de polipropileno. Las vigas de hormigón con 30 % de AGR, 5 % de CR y 0,5 % de FPP presentaron una mejor capacidad de flexión, ductilidad y tenacidad. En suma, esta investigación demostró un nuevo camino hacia la producción más ecológica de mezclas de concreto sostenible, que podría ser replicada en estudios futuros.

En esa misma línea, Groli y Pérez [42] emplearon fibras metálicas de neumáticos reciclados con el objeto de mejorar el comportamiento en servicio del concreto, para ello realizaron tres series de ensayos, a saber: sobre vigas sujetas a dos cargas puntuales, sobre componentes de tamaño reducido y sobre vigas con amplio momento constante. Finalmente, sus resultados evidenciaron el producto efectivo de añadir fibras metálicas en el comportamiento estructural del concreto, mejorando sus condiciones de trabajabilidad, servicio y resistencia.

Por su parte, Farfán y Leonardo [17] evaluaron la resistencia a la flexión y la compresión de una mezcla de hormigón de 21 MPa adicionando aditivo plastificante a los 7, 14 y 28 días, utilizando además en su estructura caucho reciclado en 5 %, 10 % y 15 % (respecto al peso de la mezcla). Analizaron tres especímenes, adicionando aditivo plastificante y caucho reciclado, y dos especímenes de control, con y sin aditivo plastificante. Las muestras en las que se utilizó 10 % y 5 % de caucho reciclado alcanzaron valores de resistencia a la compresión de 21 MPa y 22 MPa respectivamente. Respecto a la capacidad de resistencia a la flexión, se alcanzó un valor pico de 82 MPa para la muestra conformada con un 10 % de caucho reciclado. Si bien se perdió resistencia mecánica a partir de una mayor adición de caucho reciclado, esta se mejoró a partir de la incorporación de aditivo plastificante. En suma, se obtuvo una mejora considerable en la capacidad de resistencia a flexión y compresión del hormigón, adicionando fibras de caucho reciclado y aditivos plastificantes.

Asimismo, Köroğlu [43] analizó el desenvolvimiento de un hormigón compuesto autocompactante (SCC, del inglés *self-compacting concrete*) reforzado con cables de acero de neumáticos reciclados. Primero indagó sobre las características frescas y fraguadas de las mezclas habituales y las reforzadas con fibras de acero, y luego analizó 16 vigas de diferentes capas con una prueba

de flexión de cuatro puntos, teniendo en cuenta variados espesores de capas y fracciones de fibras. En suma, como una de sus conclusiones, refiere que aparte de darle utilidad a desechos que afectan el medio ambiente, como es el caso de neumáticos reciclados, estos se pueden reutilizar y extraer algunos componentes como sus fibras de acero y emplearlas para mejorar el comportamiento en compresión y flexión de elementos estructurales que están constituidos por mezclas de hormigón.

A continuación, de manera complementaria a las investigaciones líneas arriba descritas, en la Tabla III se muestra un resumen de las referencias utilizadas en la presente revisión, aquí se especifica el tipo de fibra artificial utilizada, el tipo de cemento, la relación agua/cemento y la resistencia alcanzada en MPa por los especímenes ensayados. Vale precisar que algunas referencias se mencionan en las Tablas III, IV y V porque no realizaron directamente ensayos ni obtuvieron resultados de laboratorio; sin embargo, presentan definiciones y el estado de arte sobre fibras utilizadas en la mejora de las propiedades del concreto.

3.2. Aplicación de fibras naturales para la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

Elbehiry *et al.* [1], [15] refieren que últimamente se ha incrementado el uso de fibras naturales como refuerzo en materiales de construcción, toda vez que tienen muchas características favorables, como ser fuertes, livianas, económicas y ecológicas. Es así que realizaron un análisis de elementos finitos de vigas reforzadas con barras de fibra de banano (BFB), para ello diseñaron vigas compuestas de estas fibras naturales, y bajo una carga puntual llevaron a cabo varios análisis mediante el programa de elementos finitos no lineal ANSYS. Sus estudios experimentales se realizaron sobre un grupo de siete de vigas de hormigón con el objeto de: (1) definir los valores más críticos del comportamiento en flexión de vigas de hormigón reforzado con fibra de banano, (2) estudiar los aspectos de las barras de fibra de banano, (3) estudiar el comportamiento de las barras de fibra de banano en las mezclas de hormigón, y (4) estudiar el efecto de las fibras de banano con diferentes calidades de hormigón. Sus resultados mostraron que el uso de fibras de banano como material de refuerzo aumentó significativamente la capacidad de resistir el agrietamiento y el descascarado en las vigas de hormigón, por lo que el uso de estas fibras como refuerzo proporcionó una mayor resistencia a la flexión con un 25 % en relación con el hormigón simple convencional.

En esa misma línea de emplear fibras de banano, Loganathan y Thirugnanam [6] realizaron un estudio experimental en el que indagaron sobre las propiedades mecánicas de un concreto híbrido añadiendo fibras de acero y fibras de banano. Para ello realizaron ensayos de laboratorio con un hormigón en condiciones normales y un hormigón fibroso, de los cuales analizaron propiedades mecánicas como capacidad de resistencia a la compresión, capacidad de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad, y propiedades de durabilidad como resistencia al ataque químico. Diseñaron mezclas de hormigón preparadas con contenidos óptimos de fibra y también sin añadir fibras (hormigón normal), a saber: vigas de concreto armado con hormigón grado M30, reforzadas con acero grado Fe415 como refuerzo principal y fibras de banano como refuerzo secundario. Estos elementos estructurales se sometieron a cargas cíclicas para evaluar su comportamiento en condiciones de carga sísmica simulada, a partir de lo cual se obtuvo que el desempeño de vigas de hormigón armado con fibra híbrida es relativamente mejor que el de las vigas de hormigón convencional. En

Tabla III. Fibras artificiales utilizadas en la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

Fibras artificiales	Tipo de cemento	Relación agua/cemento (a/c)	Proporciones de fibra en peso y/o volumen	Resistencia alcanzada (MPa)	Referencia
Plástico	Cemento Portland tipo I	0,3 y 0,4	20 %	Compresión: 70	[11]
Plástico marino	Cemento Portland ordinario	0,58	2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %	Compresión: 19	[21]
Tereftalato de polietileno	Cemento Portland CP II Z - 32	0,5	15 %, 30 % y 45 %	No se detalla	[34]
Polietileno	Cemento Portland ordinario	0,5	1,5 % y 2,5 %	Compresión: 25	[33]
Acero y polipropileno	Cemento Portland ordinario	No se detalla	0 %, 1 % y 2 %	No se detalla	[2]
Acero	Cemento Portland CEM I 52.5 R	0,2	0 % a 2,6 %	Compresión: 29	[35]
Acero	Cemento Portland tipo I	0,5	20 %	Compresión: 29	[9]
Acero ZP-306	Cemento Portland ordinario	0,6	0 %, 25 %, 50 % y 100 %	Compresión: 26 a 36	[5]
Acero	Cemento Portland ordinario	0,55	15 % a 35 %	Compresión: 23	[44]
Acero y vidrio	Cemento Portland ordinario	0,35 y 0,45	0,3 %, 0,6 % y 0,9 %	Compresión: 54	[39]
Acero RC-65/35- BN	Cemento Portland convencional tipo I	0,58	10 % a 25 %	Compresión: 36 a 46	[38]
Acero	Cemento Portland ordinario	0,5 y 0,69	0,66 % y 1,1 %	Compresión: 38	[32]
Acero	Cemento Portland CEM I 42.5 R	0,42	1 % a 5 %	Compresión: 45	[43]
Metales	Cemento Portland ordinario	0,42	0,5 % y 1 %	Compresión: 49 y 66	[4]
Metales reciclados	Cemento Portland Ordinario	0,5	0,5 % a 1,3 %	Compresión: 34	[42]
Caucho	Cemento Portland tipo I	0,48	10 % a 20 %	Compresión: 33	[17]
Caucho y polipropileno	Cemento Portland ordinario	0,5	0 % y 0,5 %	Compresión: 31	[41]
Aditivo + nanosílice	Cemento Portland tipo I	0,2	1 % a 1,5 %	Compresión: 62	[22]
Escoria granulada de alto horno	Cemento Portland ordinario	0,3	0 %, 20 %, 30 % y 40 %	Compresión: 56	[36]

lugar de considerar un solo tipo de fibra, la combinación de dos tipos (acero y banano) aumentó sustancialmente la ductilidad y el grado de absorción de energía; además, el fenómeno representa y es particularmente adecuado para estructuras ubicadas en áreas sísmicas.

Tabla IV. Fibras naturales utilizadas en la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

Fibras naturales	Tipo de cemento	Relación agua/cemento (a/c)	Proporciones de fibra en peso y/o volumen	Resistencia alcanzada (MPa)	Referencia
Corteza de plátano	Cemento Portland	0,3	1,8 %	Compresión: 25	[1]
Corteza de plátano	Cemento Portland	0,3	25 %	Compresión: 18	[15]
Bagazo de caña de azúcar	Cemento Portland	0,48	2,5 %	Compresión: 41	[23]
Bagazo de caña de azúcar	Cemento Portland ordinario	0,56	0 %, 2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %	Compresión: 30	[45]
Bonote (coco)	Cemento estabilizado	0,45 y 0,6	1 % a 5 %	Compresión: 11	[46]
Cáscara de arroz	Cemento Portland tipo I	0,5	20 %	Compresión: 29	[9]
Cáscara de arroz	Cemento Portland	0,45	10 %	Compresión: 57	[28]
Cáscara de arroz	Cemento Portland	0,55	2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %	Compresión: 32	[47]
Escoria de carbón	Cemento Portland tipo I	0,45	25 %	Compresión: 36	[48]

Otro de los componentes naturales utilizados hoy en día para la mejora de las propiedades del concreto son las cenizas, en ese contexto, Bheel *et al.* [45] analizaron las propiedades mecánicas del hormigón después de combinar cenizas de fibra de caña de azúcar con piedra caliza. Para ello evaluaron las propiedades del hormigón fresco y endurecido mediante la sustitución del cemento por cenizas de caña de azúcar (SCBA, del inglés sugarcane bagasse ash) y finos de piedra caliza (LSF, del inglés lime stone fines). El cemento fue reemplazado por cenizas y finos de piedra caliza en 0 % (0 % SCBA + 0 % LSF), 5 % (2,5 % SCBA + 2,5 % LSF), 10 % (5 % SCBA + 5 % LSF), 15 % (7,5 % SCBA + 7,5 % LSF) y 20 % (10 % SCBA + 10 % LSF), respecto al peso del cemento. Para ello utilizaron un total de 60 probetas de hormigón con proporción de mezcla de 1:1.5:3 y una relación a/c de 0,56, las mismas que se ensayaron para determinar la capacidad de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción por rotura a los 7 y 28 días respectivamente. Sus resultados demostraron que la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción aumentaron en un 10,33 % y 10,10 %, para la proporción de 5 % de cenizas de caña de azúcar + 5 % de finos de piedra caliza, como reemplazo del cemento, después del día 28; sin embargo, la resistencia a la compresión del hormigón disminuyó a medida que aumentaba el contenido de cenizas de fibra de caña de azúcar y finos de piedra caliza.

Por otro lado, Deep y Dulal [46] realizaron un estudio de las propiedades de ingeniería de bloques de tierra apisonada reforzados con fibra no estabilizada y estabilizada con cemento. Investigaron el efecto de la cantidad de fibra de coco (bonote), la longitud y el contenido de cemento sobre las propiedades de bloques de tierra apisonada en términos de resistencia, densidad y durabilidad, seguido de la estimación de las propiedades mediante un análisis de regresión estadístico. Como refuerzo utilizaron bonote de 1 % a 5 % en peso, con longitudes de 25 mm a 50 mm, además de 10 % de cemento como estabilizador; así la resistencia a la compresión en seco aumentó, habiendo considerado 1 % de bonote de 25 mm de longitud. Disminuyó gradualmente con el aumento del

Tabla V. Otros materiales utilizados para la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón

Materiales	Tipo de cemento	Relación agua/cemento (a/c)	Proporciones de fibra en peso y/o volumen	Resistencia alcanzada (MPa)	Referencia
Ceniza volante	Cemento Portland CPS 30R	0,6	20 %, 40 % y 60 %	Compresión: 35	[8]
Cenizas volantes y escoria de alto horno	Cemento Portland ordinario	0,48	2,6 %	Compresión: 44	[10]
Ceniza volante	Cemento puzolánico tipo IP	0,56	2,5 %, 5 %, 10 % y 15 %	Compresión: 22	[24]
Ceniza volante	Cemento Portland ordinario	0,4	No se detalla	Compresión: 18	[51]
Ceniza volante	Cemento Portland ordinario	0,33	15 %, 20 %	Compresión: 67	[52]
Nitrato de potasio (KNO₃)	Cemento Portland tipo III	0,45	No se detalla	Compresión: 30	[14]
Agregados reciclados	Cemento Portland ordinario	0,34	No se detalla	Compresión: 6. Módulo de rotura: 2	[25]
Agregado de bloque de arcilla triturado	Cemento Portland ordinario	0,7	No se detalla	Compresión: 11	[53]
Concreto reciclado	Cemento Portland V-ARI	0,8	No se detalla	Compresión: 8	[54]
Concreto reciclado	Cemento Portland ordinario	0,3	No se detalla	Compresión: 34	[55]

porcentaje y la longitud de la fibra; no obstante, la resistencia a la tracción aumentó con el incremento del porcentaje y la longitud del bonote. Los bloques de tierra apisonada estabilizada con cemento (CSRE, del inglés *cement stabilized rammed earth*) reforzados con fibra de bonote al 1 % y 3 % con longitudes de 25 mm y 50 mm respectivamente cumplieron los criterios de durabilidad especificados por normas como la ASTM D-698-12. Las propiedades de resistencia y durabilidad se vieron mejoradas con la estabilización con cemento, toda vez que se redujo la porosidad de la microestructura del material, al igual que el refuerzo de bonote junto con el cemento, que aumentó la eficiencia de las muestras de tierra apisonada. Con base en el análisis estadístico realizado para predecir la resistencia a la compresión y la tracción, correlacionando el porcentaje de fibra de coco, la longitud, la densidad y el contenido de cemento, se elaboraron ecuaciones a partir del análisis de regresión, presentándose una fuerte correlación entre los valores reales y previstos, que se pueden utilizar para la predicción precisa de las propiedades de tierra apisonada.

Por su parte, Venites *et al.* [21] evaluaron las características mecánicas del hormigón elaborado con fibras de plástico marino desechado, para lo cual elaboraron dosificaciones de hormigón convencional y con sustitución del 2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %, en masa de los agregados finos. Después de realizar las dosificaciones elaboraron muestras cilíndricas de diámetro 150 mm x 300 mm de altura y estudiaron el *slump* (asentamiento), la densidad, el módulo de elasticidad y la resistencia. Sus resultados evidenciaron que un incremento de la cantidad de plástico genera una reducción del *slump*, así como un incremento de la resistencia y del módulo de elasticidad. Las muestras con reemplazos del 7,5 % evidenciaron una mejora de la capacidad de resistencia a la compresión (18,19 MPa) similar al 90,5 % del convencional (20 MPa). En suma, sus resultados hallados representan información relevante que incentiva a la reutilización de residuos plásticos del mar para la producción de hormigón con resistencia moderada.

En la misma línea, Alvarado *et al.* [12], reemplazando la arena por plástico reciclado, analizaron la capacidad de resistencia a la compresión de bloques de hormigón. Elaboraron para ello bloques con agregado de polvillo proveniente de industrias, polietileno de baja densidad (PEBD), polietileno de alta densidad (PEAD) y polipropileno (PP). Así adicionaron en peso de material de hormigón, 12 % de polvillo, 8 % de PEBD, 16 % de PEAD y 20 % de PP, habiéndose obtenido que con el PEBD y PP adicionados en un 5 % cada uno, se superó el fraguado del concreto a los 28 días, alcanzando la resistencia máxima a la compresión los $2 \pm 0,3$ MPa. En suma, es factible realizar bloques de hormigón con agregados plásticos reciclado. Se encontró que para el PP es posible realizar bloques entre 20 y 12 % de agregado, para el PEBD solo es posible con agregados de 5 %, mientras que para el polvillo y PEAD no es posible realizar bloques agregando entre 20 y 12 %. Vale indicar que la forma y granulometría en la que se encuentra el plástico reciclado puede ser un ruido no controlado en los ensayos, lo cual influye significativamente en la cantidad que se agrega al bloque a elaborar, y que podría ser estudiado en trabajos futuros.

A continuación, de manera complementaria a las investigaciones descritas, en la Tabla IV se muestra un resumen de las referencias utilizadas en la presente revisión, aquí se especifica el tipo de fibra natural utilizada, el tipo de cemento, la relación agua/cemento y la resistencia alcanzada en MPa por los especímenes ensayados. Vale precisar que algunas referencias se mencionan en la Tabla IV porque no realizaron directamente ensayos ni obtuvieron resultados de laboratorio; sin embargo, presentan definiciones y el estado de arte sobre fibras naturales utilizadas en la mejora de las propiedades del concreto.

3.3. Otras aplicaciones para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón

Bheel *et al.* [47] evaluaron los efectos de las cenizas de cáscara de arroz (CCA) y cenizas volantes (CV) sobre las propiedades mecánicas del hormigón, sustituyendo parcialmente al cemento. El cemento fue reemplazado en peso con CCA y CV en un 5 % (2,5 % CCA + 2,5 % CV), 10 % (5 % CCA + 5 % CV), 15 % (7,5 % CCA + 7,5 % CV) y 20 % (10 % CCA + 10 % CV). Ensayaron 90 muestras de hormigón con proporciones de mezcla de 1:2:4 y una relación a/c de 0,55. Emplearon probetas cúbicas y cilíndricas para medir la resistencia a la tracción y la compresión, respectivamente, después de 7 y 28 días. Sus resultados mostraron que después de 28 días la resistencia a la compresión de la muestra al 5 % de CCA + 5 % de CV mejoró en un 16,14 % y la resistencia a la tracción mejoró en un 15,20 % en comparación con la muestra de hormigón tradicional. Asimismo, el valor de asentamiento de la muestra disminuyó a medida que aumentaba el contenido de CCA y CV.

Mejias y Águila [11] evaluaron la resistencia a la compresión de morteros elaborados con cemento, aditivo súper plastificante y puzolana, con el objeto de producir hormigón de alta resistencia. Microsílice fue la puzolana empleada y policarboxilato el súper plastificante, este último permitió reducir la relación agua/cemento. Desarrollaron dos fases en laboratorio, en la primera determinaron la proporción adecuada de cemento-microsílice en función de la resistencia a compresión, con variadas dosificaciones de estos componentes. En la segunda etapa definieron la proporción necesaria de aditivo súper plastificante para disminuir la relación a/c a valores entre 0,30 y 0,40; y con ello aumentar la resistencia a compresión, teniendo como objetivo sobrepasar los 70 MPa. En

función de sus resultados, la mayor resistencia se alcanzó cuando se adicionó 20 % de microsílíce respecto al material cementante y cuando se adicionaron 11,60 litros de polycarboxilato por cada m³ de concreto. Con esta conjugación a los 28 días la resistencia a la compresión alcanzó los 79,3 MPa; no obstante, para la adición de 15 % de microsílíce solo se necesitaron 10,2 litros de polycarboxilato y se logró una resistencia de 74,3 MPa, valor óptimo y con virtudes económicas.

Shariful *et al.* [50], en el marco de mejorar las propiedades de materiales adicionando componentes reciclados, evaluaron la capacidad de los residuos industriales tales como las cenizas volantes (CV), junto al cemento, como estabilizadores para la producción de bloques de tierra estabilizada comprimida (CSEB, del inglés *compressed stabilized earth block*). Para ello consideraron una combinación diferente de cemento y cenizas volantes para preparar CSEB (5 % a 10 % de cemento y 5 % a 25 % de CV, por peso de suelo seco), y para encontrar la composición de mezcla óptima en términos de resistencia, durabilidad y deformación. Es así que con el aumento del contenido de cemento, la resistencia de los bloques aumentó gradualmente; sin embargo, con la adición de cenizas volantes la resistencia se incrementó hasta un cierto límite y luego comenzó a disminuir. Se obtuvo que la inclusión de 7 % a 8 % de cemento y 15 % a 20 % de cenizas volantes proporcionó una resistencia a la compresión en seco adecuada (>5 MPa), una resistencia a la compresión de húmedo a seco (>0,33 MPa) y una durabilidad suficiente en términos de absorción de agua (<20 %), según lo recomendado por el British Standard and Standards Australia. Con un contenido de cemento definido y con el incremento de cenizas volantes, la deformación máxima y la deformación por falla aumentaron; lo que indicaba una capacidad de deformación mejorada de los bloques debido a la inclusión de cenizas volantes. Además, el módulo de elasticidad mejoró al aumentar la cantidad de cemento y cenizas volantes tanto en estado seco como húmedo. Finalmente se concuerda con lo referido por los autores, quienes indican que los CSEB preparados con cemento y cenizas volantes como estabilizadores pueden utilizarse como materiales de construcciones ecosostenibles; además, esto da paso a otras líneas de investigación para el estudio de materiales reciclados como plástico, vidrio y polímeros.

4. Conclusiones

Se realizó una búsqueda sistemática de artículos científicos y de revisión referentes al mejoramiento de las propiedades mecánicas del hormigón adicionando fibras artificiales y naturales. Se concluye que entre las fibras artificiales más utilizadas por los investigadores destacan las fibras metálicas, con una relación promedio agua/cemento de 0,42, una proporción promedio de fibra de 0,5 % a 1 %, permitiendo alcanzar así resistencias promedio en compresión de entre 49 y 66 MPa. Vale indicar además que entre las fibras artificiales aplicadas para mejorar las propiedades del concreto también destacan las fibras de caucho reciclado, las fibras de plástico, las fibras de vidrio y las cenizas volantes provenientes de industrias, que, si bien no son directamente fibras, derivan de las antes mencionadas.

En el marco de la aplicación de fibras naturales para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, se identificaron las fibras de banano, fibras del bagazo de caña de azúcar, fibras de bonote, fibras de cascarilla del arroz, fibras de cascarilla de café, entre otras.

Se concluye que los compuestos cementosos de ingeniería (CCI) tienen excelentes propiedades mecánicas que los hacen adecuados para aplicaciones de construcción y reparación; no obstante, el alto costo y el suministro limitado de la arena de sílice comúnmente utilizada como único agregado ha limitado su uso generalizado. De ahí que proponen el uso de hormigón reciclado, pues como parte de su evaluación de sostenibilidad y costo realizado, indican que el uso de hormigón reciclado como agregado en mezclas es sostenible y económico.

Finalmente indicar que mejorar la calidad de las estructuras de hormigón a partir del uso de fibras artificiales como naturales es vital, toda vez que se busca optimizar el tiempo de vida útil y prevenir daños a futuro frente a los problemas recurrentes de las construcciones.

Referencias

- [1] A. Elbehiry, and M. Mostafa, “Finite element analysis of beams reinforced with banana fiber bars (BFB)”, *Fibers*, vol. 8, no. 8, 2020. <https://doi.org/10.3390/fib8080052> ↑2, 9, 11
- [2] A. Karimipour, and M. Ghalehnovi, “Comparison of the effect of the steel and polypropylene fibres on the flexural behaviour of recycled aggregate concrete beams”, *Structures*, vol. 29, pp. 129-146, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.11.013> ↑2, 6, 10
- [3] E. P. Sumukh, S. K. Goudar, and B. B. Das, “A Review on the Properties of Steel-Concrete Interface and Characterization Methods”, *Smart Tech. Sustain. Devel.*, vol. 78, pp. 167-203, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5001-0_15 ↑2
- [4] G. Sanz Diéz de Ulzurrun Casals y C. Zanuy Sánchez, “Caracterización del comportamiento en flexión del hormigón reforzado con fibras sometido a impacto”, *Hormigón y Acero*, vol. 68, no. 282, pp. 139-145, 2017. ↑ 2, 10
- [5] J. Carrillo, A. P. Barrera Peñaloza y D. A. Acosta, “Evaluación del desempeño a tensión por compresión diametral del concreto reforzado con fibras de acero ZP-306”, *Ing. Competitividad*, vol. 16, no. 1, pp. 261-272, 2014. ↑2, 10
- [6] P. Loganathan, and G. S. Thirugnanam, “Experimental study on mechanical properties and durability properties of hybrid fibre reinforced concrete using steel and banana fibres”, *J. Struc. Eng.*, vol. 44, no. 6, pp. 577-585, 2018. ↑ 2, 9
- [7] L. J. Rodríguez, W. A. Sarache y C. E. Orrego, “Compuestos de poliéster reforzados con fibra de plátano/banano (*Musa paradisiaca*) modificada químicamente. Comparación con fibra de vidrio y fique (*Furcraea andina*)”, *Información Tecnológica*, vol. 25, no. 5, pp. 27-34, 2014. ↑2
- [8] C. A. Juárez Alvarado, J. R. González López, J. M. Mendoza Rangel y A. A. Zaldivar Cadena, “Compuestos cementantes fibroreforzados de bajo impacto ambiental comportamiento mecánico”, *Alconpat*, vol. 7, no. 2, pp. 135-147, 2017. <https://doi.org/10.21041/ra.v7i2.189> ↑2, 12
- [9] E. d. J. Vidaud Quintana, “Uso de fibras metálicas y naturales como adición al concreto”, *Construcción y Tecnología en Concreto*, p. 12, 2016. ↑2, 10, 11
- [10] G. Valencia Saavedra, E. Angulo Ramírez y R. Mejía de Gutiérrez, “Resistencia química de concretos de activación alcalina ceniza volante/escoria: sulfatos y ácidos”, *Informador Técnico*, vol. 82, no. 1, pp. 67-77, 2018. <https://doi.org/10.23850/22565035.1351> ↑2, 12
- [11] L. S. Mejias Guevara y I. Águila Arboláez, “Estudio de la resistencia a la compresión de morteros a base de cemento, puzolana, ys uperplastificante para su aplicación en concreto de alta resistencia”, *Rev. de la Fac. de Ing.*, vol. 33, no. 3-4, 2018. ↑3, 10, 13
- [12] M. B. Alvarado Bawab, S. Vega y J. Marín, “Elaboración de bloques de concreto con agregados plásticos reciclados”, *Informador Técnico*, vol. 82, no. 2, pp. 38-40, 2018. ↑3, 13
- [13] W. A. Castro López, H. A. Rondón Quintana y J. C. Barrero Calixto, “Evaluación de las Propiedades Reológicas y Térmicas de un Asfalto Convencional y Uno Modificado con un Desecho de PEBD”, *Ing.*, vol. 21, no. 1, pp. 7-18, 2016. ↑3
- [14] A. C. Velezmoro Capaldo, H. A. Blanco y C. Peñuela, “Influencia del nitrato presente en el agua de mezclado sobre las propiedades físicas del concreto”, *Rev. de la Fac. de Ing.*, vol. 29, no. 2, pp. 61-67, 2014. ↑3, 12

- [15] A. Elbehiry, O. Elnawawy, M. Kassem, A. Zaher, N. Uddin, and M. Mostafa, "Performance of concrete beams reinforced using banana fiber bars", *Case Studies in Construction Materials*, vol. 13, no. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00361> ↑3, 9, 11
- [16] D. Armas Ruiz, S. Ruiz Galarza, M. Piovan, L. Carrión Matamoros y C. Narváez Muñoz, "Caracterización de propiedades mecánicas de las fibras de banano de la corteza y el cuerpo del tallo", *Científica*, vol. 20, no. 1, pp. 21-31, 2016. ↑3
- [17] M. Farfán y E. Leonardo, "Caucho reciclado en la resistencia a compresión y flexión de concreto modificado con aditivo plastificante", *Ing. de Construcción*, vol. 33, no. 3, pp. 241-250, 2018. ↑3, 8, 10
- [18] G. J. Peláez Arroyave, S. M. Velásquez Restrepo y D. H. Giraldo Vásquez, "Aplicaciones de caucho reciclado: una revisión de la literatura", *Cienc. Ing. Neogranad.*, vol. 27, no. 2, pp. 27-50, 2017. <https://doi.org/10.18359/rcin.2143> ↑3
- [19] A. Alnedawi, and M. A. Rahman, "Recycled concrete aggregate as alternative pavement materials: Experimental and parametric study", *J. Transp. Eng. B: Pavements*, vol. 147, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000231> ↑3
- [20] O. O. Rodríguez Rubio, A. E. Fernández Muñoz y H. A. Vacca Gámez, "Comportamiento de un material granular con adición de concreto hidráulico reciclado en Colombia", *Carreteras*, no. 217, pp. 66-72, 2018. ↑3
- [21] J. F. Venites Mosquera, Y. M. Córdoba Palacios, K. P. Mena Ramírez y O. F. Arbeláez Pérez, "Propiedades mecánicas de concretos modificados con plástico marino reciclado en reemplazo de los agregados finos", *Politécnica*, vol. 16, no. 31, pp. 77-84, 2020. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v16n31a6> ↑3, 10, 12
- [22] A. Pajuelo Amez y A. Pómez, "Concreto de alto desempeño utilizando nanosílice", *Concreto al día - ACI Perú*, pp. 40-46, 2015. ↑3, 10
- [23] B. M. Paricaguán Morales y J. L. Muñoz Cuevas, "Estudio de las propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras de bagazo de caña de azúcar", *Ingeniería UC*, vol. 26, no. 2, pp. 202-212, 2019. ↑3, 11
- [24] S. Huaquisto Cáceres y G. Belizario Quispe, "Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento", *Rev. Investig. Altoandín*, vol. 20, no. 2, pp. 225-234, 2018. <https://doi.org/10.18271/ria.2018.366> ↑3, 12
- [25] V. A. Ulloa Mayorga, M. A. Uribe Garcés, D. P. Paz Gómez, Y. A. Alvarado, B. Torres, and I. Gasch, "Performance of pervious concrete containing combined recycled aggregates", *Ing. Investig.*, vol. 38, no. 2, pp. 34-41, 2018. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.v38n2.67491> ↑3, 12
- [26] N. Rojas Arias, L. J. Torres Parra, M. P. Espinoza Merchán, and P. M. Cocha Vesga, "Recovery and incorporation of expanded polystyrene solid waste in light-weight concrete", *Ing.*, vol. 25, no. 3, pp. 237-249, 2020. <https://doi.org/10.14483/23448393.15681> ↑3
- [27] A. Aguado, L. Agulló, A. De la Fuente, S. H. Pialarissi Cavalero y L. Segura-Castillo, "Innovaciones del hormigón con fibras estructural", VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil Valencia, 2015. ↑3
- [28] T. Shanmuga Priya, A. Mehra, S. Jain, and K. Kakria, "Effect of graphene oxide on high-strength concrete induced with rice husk ash: mechanical and durability performance", *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 6, no. 1, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00378-9> ↑3, 11
- [29] B. Li, W. Huang, B. Luo, and G. Chen, "Cycle behaviour of precast composite wall with different ecological filled blocks", *Adv. Struct. Eng.*, vol. 22, no. 2, 2019. <https://doi.org/10.1177/1369433218785212> ↑3
- [30] C. Lacerda Gomes, F. S. Jacques Poggiali y R. Cabral de Azevedo, "Concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição e adições minerais: uma análise bibliográfica", *Matéria*, vol. 24, no. 2, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0673> ↑3
- [31] D. Macanjo Ferreira, E. Luso, M. Lurdes Cruz, L. M. R. Mesquita, and G. Gontijo, "Fire behaviour of ecological soil-cement blocks with waste incorporation: Experimental and numerical analysis", *J. Fire Sci.*, vol. 38, no. 2, 2020. <https://doi.org/10.1177/0734904119893921> ↑3
- [32] M. G. Alberti, A. Picazo, J. C. Gálvez, and A. Enfedaque, "New methodological approach towards a complete characterization of structural fiber reinforced concrete by means of mechanical testing procedures", *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 14, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10144811> ↑5, 10
- [33] P. O. Awoyera, O. B. Olalusi, and N. Iweriebo, "Physical, strength, and microscale properties of plastic fiber-reinforced concrete containing fine ceramics particles", *Materialia*, vol. 15, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100970> ↑5, 10
- [34] J. M. Lima Barreto, H. Nogueira da Costa, L. F. Cândido y A. E. Bezerra Cabral Correio, "Análise das propriedades físicas e mecânicas de blocos de concreto prensados sem função estrutural com incorporação de PET reciclado",

- Matéria*, vol. 24, no. 2, pp. 1-12, 2019. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620190002.0672> ↑5, 10
- [35] N. Generosi, J. Donnini, and V. Corinaldesi, “Characterization of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) tensile behaviour”, *Fibre Reinforced Concrete: Improvements and Innovations*, vol. 30, pp. 1068-1078, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_94 ↑6, 10
- [36] W. M. Tawfeeq, T. K. Mohammed Ali, Y. Al-Kumzari, M. Al-Hosni, K. Al-Fazari, M. Al-Bedwawi, and A. Al-Bashkardi, “Flexural performance of reinforced concrete beams made by using recycled block aggregates and fibers”, *Innov. Infrastruct. Solut.* vol. 6, no. 38, 2021. <https://doi.org/10.1007/s41062-020-00402-y> ↑6, 10
- [37] J. Carrillo, D. Silva y M. Sánchez, “Desempeño de losas de concreto sobre terreno reforzadas con malla electrosoldada o fibras de acero”, *Ing. Investig. Tecnol.*, vol. 17, no. 4, pp. 499-510, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.009> ↑7
- [38] J. Carrillo, J. Cárdenas Pulido y W. Aperador Chaparro, “Efecto del ion cloruro sobre las propiedades mecánicas a compresión del concreto reforzado con fibras de acero RC-65/35-BN”, *Ing. Desarro.*, vol. 33, no. 2, pp. 149-171, 2015. ↑7, 10
- [39] J. Akbari, and A. Abed, “Experimental evaluation of effects of steel and glass fibers on engineering properties of concrete”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, vol. 54, pp. 116-127, 2020. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.54.08> ↑7, 10
- [40] V. Ortega-López, A. García-Llona, V. Revilla-Cuesta, A. Santamaría y J. San José, “Fiber-reinforcement and its effects on the mechanical properties of high-workability concretes manufactured with slag as aggregate and binder”, *J. Build. Eng.*, vol. 43, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102548> ↑7
- [41] M. Shahjalal, K. Islam, J. Rahman, K. S. Ahmed, M. R. Karim y A. M. Billah, “Flexural response of fiber reinforced concrete beams with waste tires rubber and recycled aggregate”, *J. Cleaner Produc.*, vol. 278, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123842> ↑8, 10
- [42] G. Grolí y A. Pérez Caldentey, “Mejora de la sostenibilidad y el comportamiento en servicio de estructuras de hormigón mediante el uso de fibras metálicas recicladas”, *Hormigón y Acero*, vol. 69, no. 286, pp. 223-233, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.07.002> ↑8, 10
- [43] M. A. Köroğlu, “Behavior of composite self-compacting concrete (SCC) reinforced with steel wires from waste tires”, *Rev. Construc.*, vol. 17, no. 3, pp. 484-498, 2019. <https://doi.org/10.7764/RDLC.17.3.484> ↑8, 10
- [44] A. S. Carey, I. L. Howard, D. A. Scott, R. D. Moser, J. Shannon y A. Knizley, “Impact of materials, proportioning, and curing on ultra-high-performance concrete properties”, *Materials Journal ACI*, vol. 117, no. 1, pp. 213-222, 2020. ↑10
- [45] N. Bheel, A. S. Memon, I. A. Khaskheli, N. M. Talpur, S. M. Talpur y M. A. Khanzada, “Effect of sugarcane bagasse ash and lime stone fines on the mechanical properties of concrete”, *Eng. Tech. Applied Sci. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 5534-5537, 2020. <https://doi.org/10.48084/etasr.3434> ↑11
- [46] S. S. Deep Raavi, and D. Dulal Tripura, “Predicting and evaluating the engineering properties of unstabilized and cement stabilized fibre reinforced rammed earth blocks”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 262, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120845> ↑11
- [47] N. Bheel, M. A. Jokhio, J. A. Abbasi, H. B. Lashari, M. I. Qureshi, and A. S. Qureshi, “Rice husk ash and fly ash effects on the mechanical properties of concrete”, *Eng. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 2, pp. 5402-5405, 2020. ↑11, 13
- [48] R. A. Robayo Salazar, P. E. Matthey Centeno, Y. F. Silva Urrego y S. Delvasto Arjona, “Comportamiento en estados fresco y endurecido de un concreto autocompactante, adicionado con escoria de carbón, y elaborado con agregado grueso de concreto reciclado”, *Informador Técnico*, vol. 78, no. 2, pp. 128-139, 2014. <https://doi.org/10.23850/22565035.96> ↑11
- [49] A. D. Ortega Sánchez y H. Gil, “Estudio del comportamiento mecánico de morteros modificados con fibras de aserrín bajo esfuerzos de compresión”, *Ingeniería y Desarrollo*, vol. 37, no. 1, pp. 20-35, 2019. ↑
- [50] M. Shariful Islam, T. E. Elahi, A. Rafat Shahriar, and N. Mumtaz, “Effectiveness of fly ash and cement for compressed stabilized earth block construction”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 255, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119392> ↑14
- [51] P. T. Jitha, B. Sunil Kumar, and S. Raghunath, “Strength development and masonry properties of geopolymer stabilised soil-LPC (lime-pozzolana cement) mixes”, *Constr. Build. Mater.*, vol. 250, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118877> ↑12
- [52] C. A. Granados, H. E. Rojas Cubides y F. Santamaria, “Evaluación del apantallamiento electromagnético del

- concreto a partir de simulaciones en alta frecuencia y la aplicación del modelo de Jonscher”, *Ing.*, vol. 25, no. 2, pp. 162-178, 2020. <https://doi.org/10.14483/23448393.15611> ↑12
- [53] L. Á. Moreno Anselmi, M. Á. Ospina García y K. A. Rodríguez Polo, “Resistencia de concreto con agregado de bloque de arcilla triturado como reemplazo de agregado grueso”, *Ingeniare. Rev. chil. ing.*, vol. 27, no. 4, pp. 635-642, 2019. ↑12
- [54] H. Guimarães Aragão, J. J. Aragão, P. R. Lopes Lima, J. M. Feitosa Lima y M. Batista Leite, “Análise teórica e experimental da deflexão de vigas T pré-moldadas produzidas com concreto reciclado”, *Rev. sul-am. eng. estrut.*, vol. 16, no. 3, pp. 114-134, 2019. <https://doi.org/10.5335/rsaee.v16i3.8609> ↑12
- [55] J. Junak, and A. Sicakova, “Effect of surface modifications of recycled concrete aggregate on concrete properties”, *Buildings*, vol. 8, no. 1, 2018. <https://doi.org/10.3390/buildings8010002> ↑12
- [56] A. Adesina, and S. Das, “Evaluation of the durability properties of engineered cementitious composites incorporating recycled concrete as aggregate”, *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 33, no. 2, 2021. <https://orcid.org/0000-0002-4262-9398> ↑

Yamalit Itamar Olivera Pérez

Ingeniera Civil de la Universidad Señor de Sipán (Chiclayo, Perú).
Correo electrónico: operezyam@crece.uss.edu.pe

Sandro Piero Guevara Saravia

Ingeniero Civil de la Universidad Señor de Sipán (Chiclayo, Perú).
Correo electrónico: gsaraviasandr@crece.uss.edu.pe

Sócrates Pedro Muñoz Pérez

Doctor en Gestión pública y Gobernabilidad de la Universidad César Vallejo. Magister en Ciencias de la Tierra con Mención en Geotecnia de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Ingeniero Civil de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Doctorando de Ingeniería Civil en la Universidad Nacional de Santa. Director de la Escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Señor de Sipán (Chiclayo, Perú).
Correo electrónico: msocrates@crece.uss.edu.pe