



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN, VINCULACIÓN Y
POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

**Estado de la investigación del uso de fibras orgánicas e inorgánicas para
el diseño de hormigones autorreparables**

**Trabajo de Titulación para optar al título de Magister en Ingeniería
Civil con Mención en Gestión de la Construcción**

Autora:

Burgos Campuzano, Cynthia Alexandra

Tutor:

MSc. Cristian Andrés Marcillo Zapata

Riobamba, Ecuador. 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Cynthia Alexandra Burgos Campuzano, con cédula de ciudadanía 0603997610, autora del trabajo de investigación titulado: Estado de la investigación del uso de fibras orgánicas e inorgánicas para el diseño de hormigones autorreparables, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 20 de septiembre de 2024.

Cynthia Alexandra Burgos Campuzano
C.I: 0603997610

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Cristian Andrés Marcillo Zapata catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: Estado de la investigación del uso de fibras orgánicas e inorgánicas para el diseño de hormigones autorreparables, bajo la autoría de Cynthia Alexandra Burgos Campuzano; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 20 días del mes de septiembre de 2024

MSc. Cristian Andrés Marcillo Zapata
0603877630

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL



Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Posgrado para la evaluación del trabajo de investigación Estado de la investigación del uso de fibras orgánicas e inorgánicas para el diseño de hormigones autorreparables, presentado por Cynthia Alexandra Burgos Campuzano, con cédula de identidad número 0603997610, bajo la tutoría de MSc. Cristian Andrés Marcillo Zapata; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 20 de septiembre de 2024.

MSc. Cristian Marcillo
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO

MSc. Andrea Zarate
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

MSc. Marcelo Guerra
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO	CERTIFICADO DE CONTENIDO DE SIMILITUD		 SGC <small>SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</small>	
	CÓDIGO:	VERSIÓN:		
	FECHA:			
	MACROPROCESO:			
	PROCESO:			
	SUBPROCESO:			

Riobamba, 11 de septiembre de 2024

CERTIFICADO

De mi consideración:

Yo **Cristian Andrés Marcillo Zapata**, certifico que **Cynthia Alexandra Burgos Campuzano** con cédula de identidad No. 060399761-0 estudiante del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción, cohorte Primera** presentó su trabajo de titulación bajo la modalidad de Proyecto de titulación con componente de investigación aplicada/desarrollo denominado: **Estado de la investigación del uso de fibras orgánicas e inorgánicas para el diseño de hormigones autorreparables**, el mismo que fue sometido al sistema de verificación de similitud de contenido TURNITIN identificando el 8% de similitud en el texto.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Ing. Cristian Andrés Marcillo Zapata Mgs.

CI: 060387763-0

Adj.-

- Resultado del análisis de similitud

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo lo dedico a mis padres y hermano por el apoyo incondicional que me han brindado durante toda mi preparación académica y que ha sido posible por su constante inspiración y guía.

A mis queridos abuelitos les dedico con profundo amor y gratitud este logro.

AGRADECIMIENTO

A mi Madre Dolorosa por bendecirme y mantener mi fe constante en el transcurso de mi vida. A todas las personas que contribuyeron de forma significativa en el cumplimiento de esta meta mis padres, hermano y abuelitos.

Un agradecimiento especial a mi tutor Ing. Cristian Marcillo quien con su asesoramiento guía han hecho posible la culminación de este trabajo investigativo.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.....	1
Introducción.....	1
Antecedentes.....	2
Planteamiento del Problema.....	3
Justificación.....	4
Objetivos.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	6
Estado del arte.....	6
Autorreparación Autógena.....	8
Autorreparación Autónoma.....	9
Fibras en la Autorreparación.....	9
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.....	13
Tipo de investigación.....	13
Descripción de la Metodología.....	13
Técnicas de Recolección de Datos.....	14
Población de Estudio y Tamaño de Muestra.....	15
Criterios de Inclusión.....	15
Criterios de Exclusión.....	16
Selección de Muestra.....	16
Método de Análisis y Procesamiento de Datos.....	18
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
Características.....	19
Elaboración.....	24
Ensayos y resultados.....	27
Propiedades mecánicas.....	27
Resistencia a la compresión.....	27
Resistencia a la flexión.....	31
Resistencia a la tracción.....	34
Reparación de fisuras.....	37
Uso de fibras en el Ecuador.....	41

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	43
Conclusiones	43
Recomendaciones	44
BIBLIOGRAFÍA	46

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 Artículos seleccionados para la revisión	16
Tabla 2 Características de la fibra y sustancias adicionales.....	20
Tabla 3 Proceso de elaboración de muestras	25
Tabla 4 Resistencia a la compresión de hormigones autorreparables con fibras	28
Tabla 5 Resistencia a la flexión de hormigones autorreparables con fibras	31
Tabla 6 Resistencia a la tracción de hormigones autorreparables con fibras	34
Tabla 7 Inspección visual de reparación de fisuras.....	38
Tabla 8 Producción científica de fibras orgánicas.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Número de artículos publicados sobre Hormigones Autorreparables con Fibras. Fuente: Scopus	3
Figura 2 Causas más frecuentes del agrietamiento en el hormigón. Elaboración propia.....	7
Figura 3 Mecanismos de autocuración autógena. Fuente: (Meraz et al., 2023).....	8
Figura 4 Tipos de autorreparación según los materiales. Fuente: (Nguyen et al., 2022)	9
Figura 5 Distribución de tipos de fibras más utilizadas en Autorreparación del Hormigón. Fuente: (Meraz et al., 2023)	11
Figura 6 Factores que influyen la autorreparación. Fuente: (Nguyen et al., 2022) (Amran et al., 2022)	12
Figura 7 Variables dependiente e independientes	13
Figura 8 Descripción de la metodología empleada. Elaboración propia.....	14
Figura 9 Uso de la herramienta Connected Papers	15

RESUMEN

Palabras claves: Autorreparación, fibras, durabilidad, fisuramiento y propiedades mecánicas

Este trabajo de investigación se basa en la revisión bibliográfica de artículos de alto impacto publicados en los últimos cinco años en bases de datos como Scopus y Science Direct, con la finalidad de encontrar los hallazgos más recientes referentes al desarrollo del uso de fibras orgánicas e inorgánicas como compuestos precursores de la capacidad autorreparativa del hormigón. Los artículos fueron filtrados con el uso de la herramienta Connected Papers.

Tras el análisis de estos documentos se evidenció las características de cada fibra y se contrastó el impacto que tiene cada una de ellas en las distintas propiedades mecánicas del hormigón; en consecuencia, se pudo determinar que las fibras antes mencionadas contribuyen a la durabilidad y reparación de elementos de hormigón. Se realizó una investigación cualitativa mediante la recopilación de los resultados obtenidos por distintos autores en base a las comparaciones de resistencias alcanzadas por muestras de control y muestras con mezclas de fibras y sustancias adicionales ensayadas posterior a la reparación de fisuras.

Con esta información se busca ampliar el conocimiento acerca del uso de distintas fibras que permitan alargar la vida útil del hormigón conservando su resistencia y disminuyendo el costo de mantenimiento, optimizando así el uso de recursos y reduciendo la fabricación de un material tan contaminante como es el hormigón y sus compuestos.

ABSTRACT

This research work is based on a bibliographic review of high-impact articles published in the last five years in databases such as Scopus and Science Direct, with the aim of finding the most recent findings regarding the development of the use of organic and inorganic fibers as precursor compounds for the self-healing capacity of concrete. The articles were filtered with the use of the Connected Papers tool.

After analyzing these documents, the characteristics of each fiber were evident, and the impact that each of them has on the different mechanical properties of the concrete was contrasted; consequently, it was determined that the fibers mentioned above contribute to the durability and repair of concrete elements. A qualitative study was conducted by compiling the results obtained by different authors based on the comparisons of resistances achieved by investigating control samples and samples with mixtures of fibers and additional substances tested after the repair of injuries.

This information aims to broaden knowledge about using different fibers to extend the useful life of concrete while preserving its resistance and reducing the cost of maintenance. Thus, it optimizes the use of resources and reduces the manufacture of such a polluting material as concrete and its compounds.

Keywords: Self-healing, fiber, durability, cracking, and mechanical properties



Reviewed by:
Dra. Myriam Trujillo Brito, Mgs.
ENGLISH PROFESSOR
c.c. 0601823214

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.

Introducción.

El hormigón es un material de construcción utilizado frecuentemente y conocido por su gran durabilidad y resistencia a la compresión (Meraz et al., 2023), estas características son importantes por el constante cambio en las condiciones físicas y ambientales a las que las estructuras se ven expuestas (Deeba & Ammasi, 2024)(Ma et al., 2024). En contraste con el acero y la madera, los elementos de hormigón no se oxidan y no son combustibles por lo que su uso es preferido por los profesionales de la construcción.

Sin embargo, esta durabilidad se puede ver afectada por diversos factores como cambios de temperatura, agentes atmosféricos, factores de servicio, retracción, ataques químicos, entre otros (Posada, 1994). Como consecuencia a los esfuerzos físicos a los que se ve sometido el hormigón este puede presentar fisuras. Yao et al. (2022) menciona que estas fisuras pueden resultar en daños superficiales o estructurales, corrosión severa, disminución de las propiedades mecánicas y altos costos de mantenimiento.

Según Meraz et al. (2023) realizar mantenimientos manuales de grandes estructuras no es una buena opción ya que las fisuras se pueden encontrar en una ubicación de difícil acceso. Entonces, es esencial la búsqueda de extender la vida útil de ciertas estructuras, asegurar que estas brinden seguridad a los usuarios y, que los costos derivados del uso propio del bien y su mantenimiento no sean exorbitantes.

Estos costos de mantenimiento y reparación de la estructura usualmente no se ven contemplados por los diseñadores o propietarios dentro del presupuesto destinado para la ejecución de un proyecto e incluso muchas veces estas actividades no son realizadas regularmente, lo que pone en riesgo seguridad de la estructura (Zhang et al., 2024). Según Jiang et al. (2024), el costo de reparación de las fisuras en China representa el 50% del valor total de mantenimiento anual, esto nos da una idea de lo costoso que resulta dar solución al agrietamiento en las estructuras, por lo que a más de la inversión inicial para construir se debe tener en cuenta un monto para poder realizar mantenimiento de la misma.

La Ley de Sitter menciona que el considerar invertir \$1 en buscar una solución para incrementar la durabilidad del hormigón en la etapa de diseño podría representar el ahorro de \$5 en mantenimiento preventivo e incluso \$25 en reparaciones estructurales. (Rostman, 1992)

Estas fisuras pueden ocasionar que la estructura se deteriore rápidamente debido a que permiten el ingreso de humedad que puede corroer la varilla o disminuir las capacidades mecánicas del elemento ocasionando inseguridad en la estructura, por lo que resulta necesario evitarlo, para lo cual se puede recurrir a métodos en los que el hormigón cierre estas fisuras por sí mismo mediante el proceso de autorreparación, ocasionando así que gracias al sellado de la fisura se impida el ingreso de sustancias químicas nocivas al núcleo de los elementos y a su vez, que el acero de refuerzo no se encuentren expuestos a la intemperie (Hassanin et al., 2024).

La aplicación de métodos de mantenimiento como el sellado de superficies y la lechada pueden mejorar un poco la durabilidad pero resultan costosos por lo que el desarrollo de materiales autorreparables se ha convertido en un tema de amplia investigación en la ingeniería de construcción (Zhang et al., 2024). Igbokwe et al. (2024) hace referencia a que los materiales con propiedades autorreparables son eficaces para reducir la permeabilidad y restaurar la resistencia y la rigidez; y Deeba & Ammasi (2024) resaltan que al sellarse las fisuras por si solas se mantendrá la calidad original con la que fue construida la estructura.

El hormigón es un material con baja resistencia a la tensión y propenso al fisuramiento, razón por la que los investigadores han contemplado las fibras como un material que brinde mejoras a estas propiedades. Las fibras pueden servir como un refuerzo para mejorar la resistencia a la compresión, la ductilidad y disminuir el tamaño de las fisuras. Uno de los beneficios de las fibras es que crean un enlace entre las caras de la grieta minimizando el tamaño de la grieta inicial y controlando su propagación (Nguyen et al., 2022).

Antecedentes.

Según Deeba & Ammasi (2024) se observa que la autorreparación data de hace más de dos mil años con la curación de grietas en monumentos de Roma como el Gran Panteón, el cual tuvo como materiales principales el polvo volcánico, pero no es hasta 1974 cuando (Munday, C., & Dhir, 1974) empezó a investigar acerca de la reparación autógena. La autorreparación autógena se da debido a las partículas de calcita no hidratada que al formarse la fisura entran en contacto con la humedad ocasionando que estas formen carbonato de calcio y creen una barrera superficial que selle la fisura (Deeba & Ammasi, 2024).

En la Figura 1 se muestra la evolución de la investigación sobre la autorreparación del hormigón con fibras, según los datos extraídos de la base de datos Scopus, en la que se revela un panorama significativo en el desarrollo de esta disciplina. Desde el año 1984, se ha observado un notable incremento en la cantidad de publicaciones sobre este tema. Hace 20 años, las investigaciones eran prácticamente inexistentes, mientras que una década atrás se registraban menos de 15 estudios anuales. Sin embargo, en el año 2023 se alcanzó un hito con cerca de 70 investigaciones publicadas.



Figura 1 Número de artículos publicados sobre Hormigones Autorreparables con Fibras. Fuente: Scopus

Este aumento de publicaciones sobre hormigones autorreparables con fibras podría ser atribuido a los reconocidos beneficios que este ofrece al sector de la construcción, particularmente en términos de prolongar la vida útil de las estructuras mediante el uso de compuestos innovadores, esta necesidad pudo haber nacido debido a que se sigue incrementando la escasez de recursos que sirven como materia prima para la construcción, ya que esta permite extender la vida útil de la infraestructura, reducir costos de mantenimiento, acrecentar la confiabilidad y promueve la sostenibilidad al minimizar el desperdicio y optimizar la utilización de recursos (Houshmand et al., 2024).

Meraz et al. (2023) menciona que el deterioro ocasionado en las estructuras de hormigón tiene un impacto negativo en la economía, así como también del tejido social y el entorno natural de un país; debido a que la construcción y los recursos invertidos en ella afectan de manera directa a la visión que se tiene de un país, no solo por su aporte al producto interno bruto sino también porque la infraestructura en gran medida simboliza el desarrollo de un país.

Por esto, la presente tesis sirve como punto de partida para brindar información que ayude a futuras investigaciones a seguir un nuevo camino, describiendo resultados de estudios realizados y sus metodologías de investigación, para así permitir que se analice más a fondo el uso de fibras existentes en el país para el desarrollo de nuevos materiales que permitan ampliar la vida útil de la estructura con propiedades mecánicas similares a las que tuvo en una etapa temprana.

Planteamiento del Problema.

La gran resistencia a las diferentes condiciones climáticas y solicitaciones de carga hacen que el hormigón sea el material de construcción más utilizado a nivel mundial. Una de las características más deseable de este compuesto es su prolongada vida útil, la cual se puede ver

afectada por la presencia de fisuras que lastimosamente son ineludibles a pesar del uso de los mejores materiales y métodos constructivos (Yao et al., 2022).

Deeba & Ammasi, (2024) mencionan que la presencia de grietas en elementos estructurales reduce la vida útil operativa de elementos de hormigón por lo que se requiere inmediata reparación y reconstrucción. Para reparar estas fisuras mediante métodos tradicionales se requiere constante intervención en las estructuras y sus costos son elevados, lo que genera perjuicio a los beneficiarios.

A más de esto, el contexto ambiental apunta a la necesidad urgente de buscar soluciones más sostenibles. Según Nguyen et al. (2022), la industria cementera es responsable del 8% de las emisiones de CO₂ a nivel global, lo cual añade una dimensión crítica al desafío de la construcción y el mantenimiento de infraestructuras. Por lo tanto, es imperativo explorar alternativas que no solo mitiguen el riesgo de fisuras en estructuras de hormigón, sino que también reduzcan la dependencia de materiales con alto impacto ambiental.

Por lo anteriormente detallado es necesario investigar si el uso de fibras orgánicas e inorgánicas puede mejorar la capacidad de autorreparación del hormigón, para poder enfocar este análisis dentro del contexto de Ecuador y verificar que fibras podrían presentar beneficios para su utilización.

Justificación.

La durabilidad de las estructuras de hormigón se ve comprometida debido al fisuramiento inevitable de sus elementos ocasionando que los aceros de refuerzo se encuentren expuestos a la humedad y generando con esto la reducción de resistencia en sus propiedades mecánicas comprometiendo la seguridad de los usuarios de estas estructuras.

Al existir la necesidad de buscar alternativas que prolonguen la vida útil del hormigón manteniendo sus propiedades mecánicas y aplicando métodos no invasivos se ha desarrollado una investigación previa en la que se vio que varios autores analizaron el uso de fibras como agentes reparadores del hormigón, las cuales han tenido resultados prometedores, por lo que se ha considerado necesario profundizar en el estudio de estos componentes y realizar una comparativa que permita visualizar las opciones con mejores resultados en el índice de reparación del hormigón.

Al comprender mejor las características de las fibras y como su uso influye en las propiedades mecánicas, índice de reparación y durabilidad del hormigón podremos ampliar nuestro conocimiento para brindar alternativas de soluciones constructivas empleando materia prima existente en el Ecuador.

Objetivos.

Objetivo General.

- Revisar el estado de la investigación del uso de fibras orgánicas e inorgánicas para el diseño de hormigones autorreparables.

Objetivos Específicos.

- Determinar qué fibras orgánicas e inorgánicas pueden ser utilizadas para potenciar la autorreparación del hormigón.
- Analizar la información recopilada, considerando los hallazgos más destacables para el diseño y determinación del comportamiento de hormigones autorreparables.
- Establecer alternativas de fibras existentes en el Ecuador que se puedan utilizar para la elaboración de hormigones autorreparables.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.

Estado del arte.

En la industria de la construcción, el hormigón es el material de construcción más utilizado en el mundo y, el segundo más consumible después del agua (Vijay & Murmu, 2019), esto por su gran resistencia a la compresión, asequibilidad, rentabilidad, abundancia de materias primas con las que es fabricado y su gran durabilidad (Meraz et al., 2023).

Aún con estas características y, a pesar de que se utilicen los mejores procesos constructivos durante su fabricación, el problema del agrietamiento es inevitable (Yao et al., 2022). Este fisuramiento puede producir que la estructura sufra otros daños como la degradación y el deterioro, lo que a su vez ocasiona que productos químicos altamente tóxicos (lluvia ácida, sales y otros elementos corrosivos) penetren en la estructura (Meraz et al., 2023).

Danish et al. (2020) hacen mención a que las causas más frecuentes para que se produzca agrietamiento en el estado plástico del hormigón son la contracción plástica, los asentamientos plásticos y el movimiento del encofrado. Mientras que, para el hormigón en estado endurecido, las sobrecargas externas, reacciones químicas, errores de detalle y estrés térmico son las principales, estas causas se muestran con más detalle en la Figura 2.

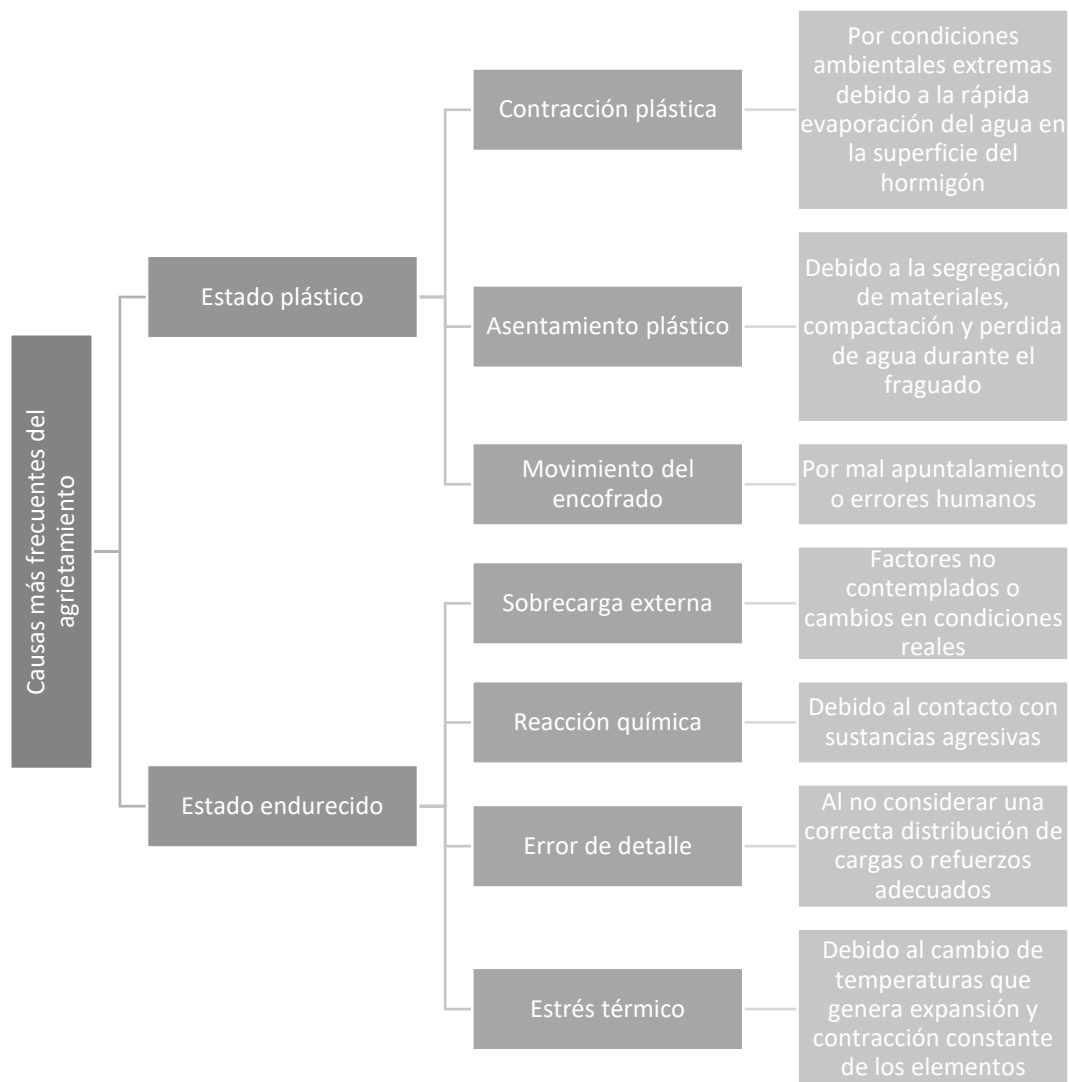


Figura 2 Causas más frecuentes del agrietamiento en el hormigón. Elaboración propia

Como se puede ver en la Figura 2 muchas de estas causas no se pueden controlar únicamente con la utilización de ciertos materiales o procesos constructivos, por lo que la necesidad de encontrar un material que permita dar solución al fisuramiento sin intervención manual es primordial para asegurar la seguridad de las estructuras (Zhang et al., 2024).

Varios estudios han reportado que el incorporar mezclas agentes que reducen la retracción del hormigón como los glicoles, mezclas químicas y minerales, fibras y agentes curativos internos ha permitido inhibir el agrietamiento en el hormigón (Yao et al., 2022), con lo que se espera incrementar la vida útil de los elementos de hormigón afianzando la seguridad de las personas que utilicen esta estructura.

El proceso de autorreparación es importante porque no requiere que el usuario o constructor se percate de la existencia de las fisuras, ni que se añada ningún material o sustancia

adicional posterior al vertido del hormigón, generando mayor seguridad al elemento ya que sella las microfisuras ocasionadas durante el fraguado creando calcificación en las fisuras gracias a agentes curativos o partículas cementicias no hidratadas, proceso que se puede dar a lo largo de toda la vida útil del hormigón. Existen dos tipos de autorreparación como son la autorreparación autógena y la autorreparación autónoma (Meraz et al., 2023)

Autorreparación Autógena

La autorreparación autógena es propia del material ya que no se incorpora ningún tipo de sustancia adicional, esta se da debido a la cristalización de calcita no hidratada que al formarse la fisura permite ingreso de humedad ocasionando que micropartículas de agua se fusionen con la calcita y generen una reacción química de sellado (Hassanin et al., 2024). A más de este existen otros mecanismos de autorreparación autógena, como se muestra en la Figura 3.

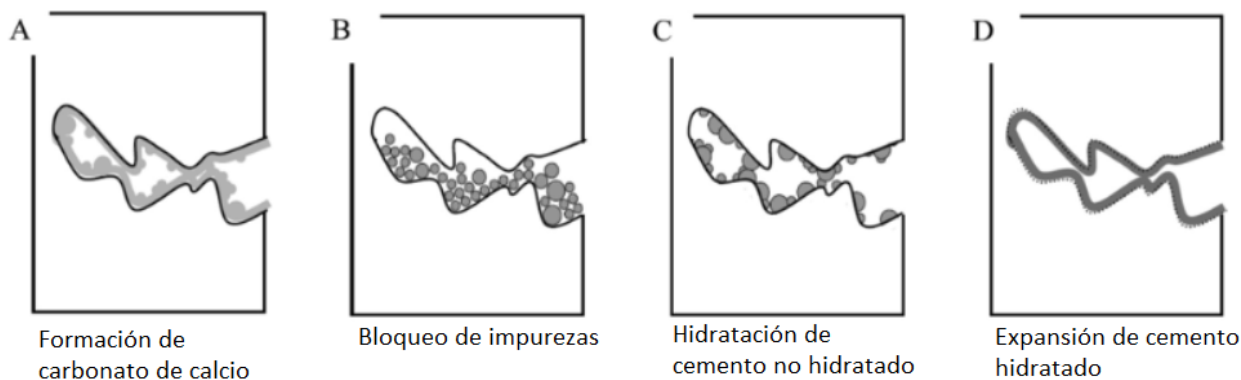


Figura 3 Mecanismos de autocuración autógena. Fuente: (Meraz et al., 2023)

Como se puede observar de la Figura 3, (b) las impurezas existentes en el agua también causan un sellado en la fisura colaborando así con la autorreparación. También siempre van a existir partículas de cemento que en el proceso de mezcla, vertido y vibrado no se lograron hidratar, las cuales al producirse la fisura quedan expuestas a la intemperie y pueden iniciar su proceso de hidratación, sellando así la fisura (c). A su vez, las partículas de cemento hidratado no necesariamente se encuentran en estado saturado, por lo que con la presencia de humedad pueden llegar a saturarse y por lo tanto expandirse (d) (Meraz et al., 2023).

Vijay & Murmu (2019) dentro de su investigación mencionan que el proceso de curación autógena permite únicamente el sellado de grietas superficiales de entre 0.1 y 0.2mm de abertura, esto se debe a dos factores: a) las micropartículas de humedad no pueden ingresar más profundamente en la grieta; y, b) que, al existir presencia de partículas de calcita no hidratada en zonas superficiales, estas reaccionan al contacto con la humedad impidiendo que se origine dicha interacción a mayor profundidad ya que la abertura se cierra en la zona superficial antes de que la humedad pueda hacer esta reacción más dentro de la abertura.

Autorreparación Autónoma

La autorreparación autónoma por otra parte se da debido a la incorporación de agentes curativos al diseño de la dosificación del hormigón (Meraz et al., 2023), estos se vierten durante el proceso de mezclado, estos agentes pueden ser microcápsulas, fibras, agentes expansivos cementicios, bacterias, cenizas y comunidades bacterianas. Para la adecuada ejecución de la autorreparación autónoma y con la finalidad de prevenir que los agentes curativos antes descritos reaccionen previo al origen de la fisura, se deberá añadir a la mezcla un medio de protección o transporte hacia las zonas afectadas incorporando sustancias químicas.

Fibras en la Autorreparación

En este estudio se va a profundizar sobre el uso de fibras como agente de autorreparación del hormigón. El uso de estos compuestos reforzados con fibras permite flexibilidad en diseño y aplicación, siendo así adaptables a requerimientos específicos de acuerdo al proyecto entre ellos elementos prefabricados, estructuras de alto rendimiento y diseños arquitectónicos innovadores (Weinmeister, 2019).

Nguyen et al. (2022) destaca dentro de su investigación que las fibras son materiales que permiten los dos tipos de autorreparación, tanto la autógena como autónoma. Como hace referencia en la Figura 4 para lograr la autorreparación autónoma no hace falta la incorporación de otro tipo de materiales más que los existentes en cualquier mezcla de hormigón como es el caso de cemento, materiales cementicios o geopolímeros, mientras que para la autorreparación autónoma se necesitan otro tipo de agentes curadores que serán vertidos en la mezcla tras un proceso que dependerá del agente escogido.

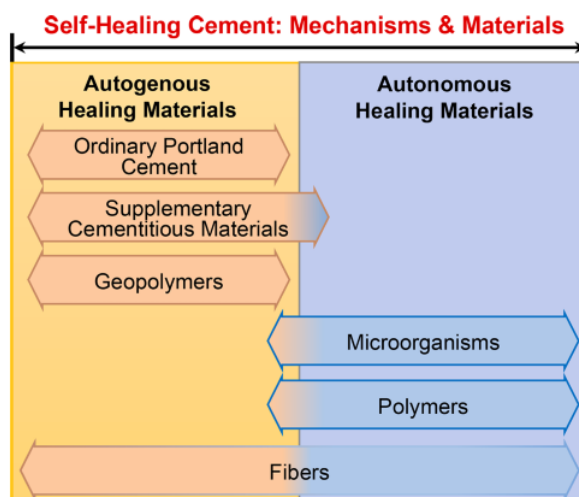


Figura 4 Tipos de autorreparación según los materiales. Fuente: (Nguyen et al., 2022)

Como se detalla en la Figura 4 las fibras aportan a ambos mecanismos de autorreparación, esto debido a que se las puede utilizar solas y acompañadas de otras sustancias que promuevan el comportamiento autorreparativo del hormigón.

Según (Vijay & Murmu, 2019), las fibras ayudan a la autorreparación autógena al reducir el ancho de la grieta funcionando como un puente, además que, este efecto también puede suprimir la propagación de microfisuras (Wu et al., 2023). A su vez (Y. Ma et al., 2022) menciona que la adición de fibras al hormigón puede desarrollar la sensibilidad del hormigón a la tensión, temperatura, humedad, magnetismo, entre otros.

Deeba & Ammasi (2024) aseguran que la curación autógena se puede estimular de las siguientes maneras:

- Introduciendo condiciones de exposición favorables
- Mejorando las propiedades de los materiales seleccionados
- Adoptando técnicas para restringir el ancho de grieta
- Adicionando fibras en la matriz cementosa
- Asegurando la presencia de agua para permitir la hidratación continua
- Empleando aditivos que mejoren el proceso de curación

Existe un sinnúmero de fibras que se pueden utilizar para la conformación de hormigones autorreparables entre las cuales los dos grandes grupos de clasificación de las mismas son: fibras orgánicas y fibras inorgánicas. Estas fibras de acuerdo a su tamaño también pueden ser consideradas como microfibras o macrofibras.

Las fibras se pueden usar en el hormigón solas o acompañadas de otro tipo de sustancia o material. Las investigaciones actuales tienden a ser relacionadas a la adición de fibras con distintas sustancias como otro tipo de fibras (2 o más fibras), nanofibras, con bacterias u otros agentes curativos y con otras técnicas de reparación (Nguyen et al., 2022).

Tras una encuesta realizada por (E. Cuenca & Ferrara, 2017) en Italia, se demostró que las fibras más utilizadas para la fabricación de hormigón autorreparable son PVA (Alcohol de Polivinilo) con el 41%, seguidas por el acero, naturales y PP (Polipropileno) al 12% y fibras de vidrio, polietileno, entre otras. Los resultados detallados de esta encuesta se pueden observar en la Figura 5.

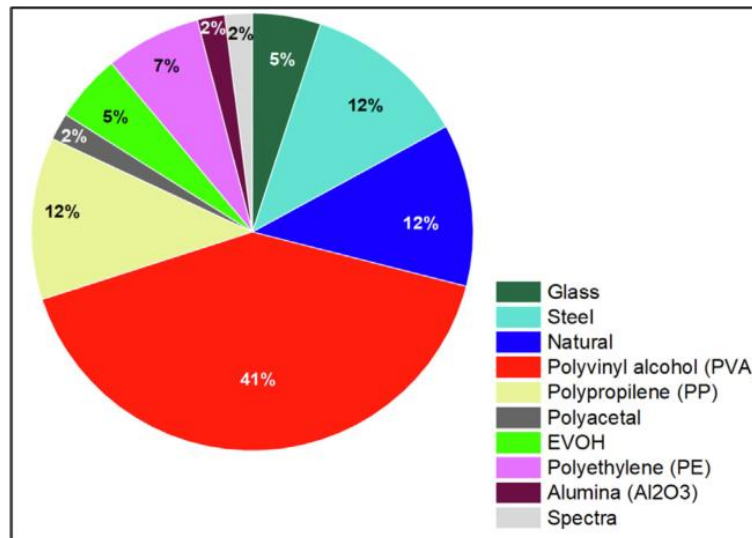


Figura 5 Distribución de tipos de fibras más utilizadas en Autorreparación del Hormigón. Fuente: (Meraz et al., 2023)

Inicialmente las investigaciones se centraron únicamente en el uso de fibras inorgánicas en el cual se realizaron pruebas visuales para posteriormente pasar a pruebas mecánicas. En el estudio de estas fibras se pudo ver que la trabajabilidad de hormigones con fibras de acero era pobre (Neves, Almeida, Miranda, Cunha, & Pereira, 2024).

Con el paso del tiempo y las nuevas tendencias sostenibles se ha buscado también la incorporación de materiales que ocasionen menor afectación ambiental, que vengan de desechos, que sean reciclados o reciclables, entre otros. El uso de fibras naturales como alternativa al uso de las fibras tradicionales ha permitido la reducción de costos, emisiones de carbono y consumo de energía mientras se obtiene hormigones ligeros, reciclables, biodegradables con alta resistencia a la flexión, dureza y resistencia al impacto (Wu et al., 2023).

Las fibras naturales pueden ser de tres tipos dependiendo de su origen: animales, vegetales y minerales. Para la construcción las fibras más utilizadas son las vegetales debido a su amplia disponibilidad, las fibras animales suelen ser las preferidas para la industria textil y las minerales no son las preferidas por ser potencialmente peligrosas para la salud (Ahmad et al., 2024).

En los últimos años los autores han enfocado su estudio en el uso de fibras en conjunto con diferentes compuestos, en su mayoría con bacterias o nanocápsulas, debido a que la aplicación de estas mezclas presenta una mejor resistencia, sin embargo, se debe realizar un análisis ya que, dependiendo del compuesto que se añada al hormigón su costo en relación al beneficio que ofrece puede o no ser económicamente viable (Deeba & Ammasi, 2024).

Homma et al. (2014) descubrió que las fibras híbridas (dos o más tipos de fibras distintos) pueden producir mejores resultados en la reparación de fisuras que los sistemas de fibras singulares, estos resultados a su vez variarán dependiendo del tipo de fibras usadas para esta mezcla o si se usan fibras de la misma especie pero de distintos tamaños ya que, incluso

dependiendo del tamaño de fibra esta tiene distintos resultados en las propiedades del hormigón (Mihashi & Kohno, 1999).

Otro tipo de uso de fibras es en conjunto con nanomateriales, su ventaja principalmente es debido a su tamaño, ya que proporcionan propiedades únicas al hormigón debido a sus grandes áreas de superficie específica y su capacidad de mejorar los compuestos cementicios al nano nivel, lo que permite mejorar las propiedades mecánicas y durabilidad por la densificación de la matriz y modificación de los poros (Nguyen et al., 2022). Amran et al. (2022) hace énfasis en los beneficios que puede traer la creación de nanosensores y nanomateriales para mejorar las capacidades de autorreparación del hormigón.

A más de la selección de fibras que contribuyan al proceso de autorreparación existen otros factores que influyen su efectividad, por lo que resulta importante al momento de realizar los ensayos verificar como cada uno de los factores descritos en la Figura 6 afecta los resultados obtenidos con las muestras.

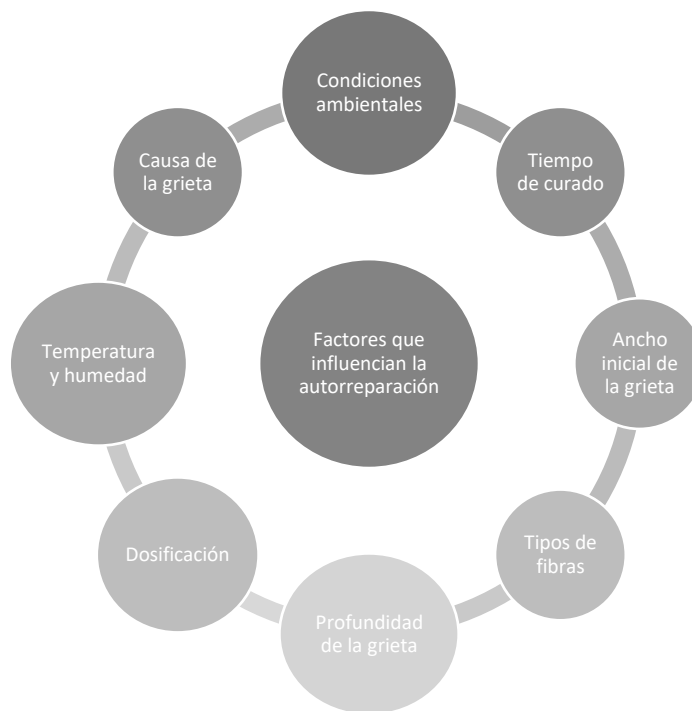


Figura 6 Factores que influyen la autorreparación. Fuente: (Nguyen et al., 2022) (Amran et al., 2022)

Para verificar la utilidad del uso de estas fibras en el hormigón autorreparable se suelen utilizar pruebas visuales y de propiedades mecánicas, Hassanin et al. (2024) y Ahmad et al. (2024) consideran que las principales pruebas a realizarse son: pruebas de asentamiento para determinar la trabajabilidad, densidad, densidad aparente, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, porcentaje de absorción, sortividad, tracción dividida, microscopía electrónica de barrido, entre otras.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA.

Tipo de investigación.

Esta investigación ha sido realizada siguiendo un enfoque cualitativo, el cual se ha desarrollado mediante la recolección de datos obtenidos de artículos de investigación y análisis de los mismos. Para la exposición del estado del arte se realizará de forma descriptiva y correlacional.

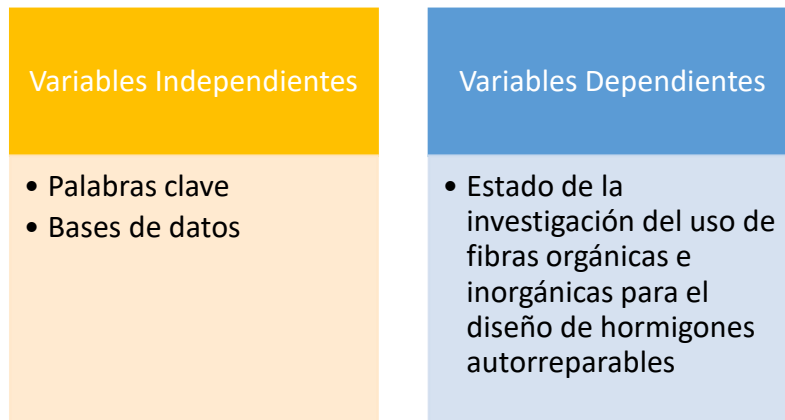


Figura 7 Variables dependiente e independientes

Descripción de la Metodología.

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó una búsqueda de artículos relevantes (revistas Q1 y Q2) dentro de los últimos 5 años sobre Hormigones Autorreparables con Fibras, utilizando palabras clave para su búsqueda. Esta se realizó en bases de datos como Scopus y ScienceDirect. Con el uso de la herramienta Connected Papers se seleccionó los artículos a ser estudiados dentro de este trabajo. Posterior se realizó un análisis de los mismos tanto de los agentes de autorreparación utilizados, metodología de mezclado y procesos de tratamiento de las muestras. Se identificaron las condiciones clave para que se de este proceso de autorreparación y un análisis de los resultados en base a parámetros definidos en los mismos artículos. Luego de esto se seleccionaron los componentes principales a detallar y se procedió con la elaboración del documento final. Este proceso se describe en la Figura 6.



Figura 8 Descripción de la metodología empleada. Elaboración propia

Técnicas de Recolección de Datos.

Se realizó la búsqueda de artículos de investigación en las bases de datos Scopus y Science Direct teniendo como parámetro de selección que estos fueran publicados en revistas de alto impacto (Q1 y Q2) y que los mismos fueran publicados en los últimos 5 años, esto con la finalidad de conocer las nuevas tendencias de investigación y las últimas tecnologías utilizadas para el desarrollo de estos materiales. Esta búsqueda se la hizo mediante la utilización de palabras clave “Self healing”, “fiber”, “durability”, “cracking” y “mechanical properties”. A más

de esto se extendió la investigación a artículos más antiguos con la finalidad de desarrollar el estado del arte de este material.

Población de Estudio y Tamaño de Muestra.

Criterios de Inclusión.

Para la selección de la muestra se consideró los artículos publicados en los últimos 5 años con la finalidad de enfocarnos en las nuevas tendencias de investigación. A más de esto se realizó la búsqueda con palabras clave en inglés para abarcar la mayor cantidad de publicaciones de revistas de relevancia (Q1 y Q2) y con esto asegurar la veracidad de los resultados obtenidos en esas publicaciones. En conjunto con el empleo de la herramienta Connected Papers se definió los artículos que se tomarían en cuenta para el desarrollo de este estado del arte.

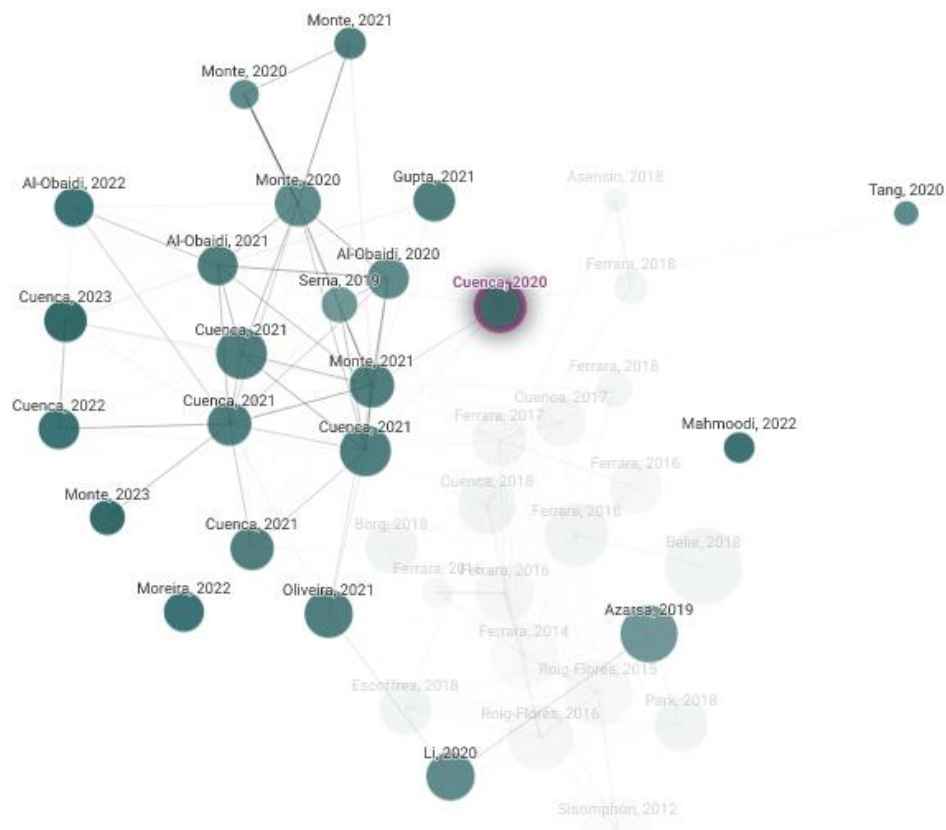


Figura 9 Uso de la herramienta Connected Papers

Se incluyeron todos los artículos que contengan información acerca del uso de fibras en hormigones autorreparables haciendo énfasis en los que se hayan desarrollado a partir de fibras naturales de plantas existentes o de fácil obtención en el país; considerando que la investigación de este material se ha enfocado como nueva tendencia en la adición de fibras con otros agentes curadores estos artículos han también han sido considerados dentro de esta investigación.

Se examinaron artículos en los cuales se detallan las fibras utilizadas, los porcentajes de uso de las mismas, la metodología empleada y pruebas realizadas para verificar las condiciones finales de las muestras en todo tipo de compuestos cementicios; a más de esto también se analizaron artículos de revisión del uso de fibras en hormigones autorreparables.

Criterios de Exclusión.

Se excluyeron aquellos artículos publicados en revistas que no sean de alto impacto. A más de esto también los que hacían referencia a hormigones autorreparables, pero no utilizaban ningún tipo de fibras.

Selección de Muestra.

Se realizó el proceso de búsqueda de artículos en las bases de datos Scopus y ScienceDirect utilizando las palabras clave y filtrando a las publicaciones de los últimos 5 años, bajo estos criterios se encontraron 292 artículos. Se utilizó también la herramienta Connected Papers con la finalidad de seleccionar artículos que estuvieran relacionados entre sí.

Posteriormente se fue revisando de uno en uno la relevancia de la revista en la cual fueron publicados y los demás criterios de exclusión, obteniendo 35 artículos que serían de utilidad para el desarrollo de este trabajo, de los cuales 25 servirán para el análisis del comportamiento de las fibras y su influencia en las características de durabilidad y sellado del hormigón y 10 serán empleados para hacer una revisión del estado del arte.

En la Tabla 1 se hace referencia a los artículos que será analizados en base al tipo de fibra utilizada en los mismos.

Tabla 1 Artículos seleccionados para la revisión

Compuesto	Fibras y más	Autor	Año	Artículo
	Celulosa	Singh & Gupta	2019	Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete (Singh & Gupta, 2019)
	Neumático	Huang et al.	2020	The Self-Sealing Capacity of Environmentally Friendly, Highly Damped, Fibre-Reinforced Concrete (Huang et al. , 2020)
FIBRA	Polipropileno	Garg et al.	2021	Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites (Garg & Azarsa, 2021)
	Coco y Maíz	Barrera et al.	2023	Comparative Study of Coconut and Corn Fibers as Aggregate in Concrete (Barrera et al., 2023)
	Bagazo de palma de datiles	Moawad & Moussa	2023	The effect of using data palm waste fibers in plain concrete mixture by comparing three pre-treatment techniques (Moawad & Moussa, 2023)

	Basalto y acero	Chen et al.	2023	Effects of basalt fiber reinforced polymer minibars on the flexural behavior of pre-cracked UHPC after chloride induced corrosion (Chen et al., 2024)
	Coco, yute, plátano, paja de arroz y cáñamo	Ahmad et al.	2024	Improvement in the strength of concrete reinforced with agriculture fibers: Assessment on mechanical properties and microstructure analysis (Ahmad et al., 2024)
FIBRA Y CENIZA	Biofibra de kenaf y ceniza de cáscara de yuca	Ogunbode et al.	2021	Mechanical and microstructure properties of cassava peel ash-based kenaf bio-fibrous concrete composites (Ogunbode et al., 2021)
	Fibras de acero y Ceniza de arveja, ceniza de madera de roble y almendro, ceniza de residuos animales	Hajmohammadian et al.	2022	Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Organic Waste Ash (Hajmohammadian et al., 2022)
	Fibra de coco y ceniza de coco	Kumar et al.	2024	Enhancing the Strength Properties of Concrete Using Coconut Fiber and Coconut Fiber Ash (Kumar et al., 2024)
	Fibras de polietileno de peso molecular ultra alto y cenizas volantes	Ma et al.	2024	Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through cementitious matrix optimization and crack width controlling (Ma et al., 2024)
	Fibras de PVA y humo de sílice	Salam et al.	2024	Effect of silica fume on fracture analysis, durability performance and embodied carbon fiber-reinforced self-healed concrete (Salam et al., 2024)
FIBRA Y BACTERIAS	Fibras de basalto y bacterias bacillus subtilis	Vijay & Murmu	2019	Self-repairing of concrete cracks by using bacteria and basalt fiber (Vijay & Murmu, 2019)
	Fibras de celulosa y bacillus subtilis	Singh & Gupta	2019	Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV (Singh & Gupta, 2020)
	Fibras de polipropileno, PVA y bacterias resistentes a los álcalis de la anhídrida carbónica	Feng, Su & Qian	2019	Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete (Feng, Su, & Qian, 2019)
	Fibras de polipropileno y bacillus alcalophilus	Su et al.	2020	Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS) (Su et al., 2020)

	Fibra de acero de llanta reciclada, cenizas voladoras y escoria de horno	Neves et al.	2024	Self-healing assessment and variability in plain and recycled tyre fiber reinforced concrete based on tensile splitting test (Neves et al., 2024)
	Fibra de polímero y comunidad bacteriana	Xiang et al.	2024	Depth-dependent self-healing capacity and mechanism of cracked fiber-reinforced concrete by bacterial community (Xiang et al., 2024)
	Fibra de celulosa y lysinibaccillus sphaericus	Igbokwe et al.	2024	Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes (Igbokwe et al., 2024)
FIBRAS Y MEZCLAS CRISTALINAS	Fibras de acero y mezclas cristalinas	Cuenca & Ferrara	2019	Fracture toughness parameters to assess crack healing capacity of fiber reinforced concrete under repeated cracking-healing cycles (Cuenca & Ferrara, 2020)
	Fibra de nylon, cenizas voladoras y aditivos cristalinos	Neeraja & Prasad	2023	Experimental investigation on self healing of fibre reinforced concrete (Neeraja & Prasad, 2023)
FIBRAS Y BACTERIAS	Fibras de coco, linaza y yute y bacillus subtilis, bacillus sphaericus y bacillus cohnii	Rauf et al.	2020	Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete (Rauf, Khaliq, Arsalan, & Ahmed, 2020)
	Fibras de PVA, cenizas volantes y bacterias subtilis	Hassanin et al.	2023	Coupling behavior of antigenous and antonomous self-healing techniques for durable concrete (Hassanin et al., 2024)
FIBRAS Y NANOCÁPSULAS	Fibras de carbono y nanotubos de carbono	Siad et al.	2017	Multi-functional cementitious composites with sensing and healing capabilities (Siad et al., 2017)
	Nanofibras de alúmina y nanocristales de celulosa	Cuenca et al.	2022	Effects of Alumina Nanofibers and Cellulose Nanocrystals on Durability and Self-Healing Capacity of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes (Cuenca et al., 2022)

Método de Análisis y Procesamiento de Datos.

Para el análisis de estos artículos se han realizado matrices en las cuales se muestren las características principales del uso de fibras, su desempeño como agente curador del hormigón, su compatibilidad con otros compuestos, desarrollo de sus propiedades mecánicas, entre otros.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

Características

Tras la revisión bibliográfica realizada se encontraron datos interesantes sobre el aporte de las diversas fibras y compuestos adicionales en el comportamiento y propiedades del hormigón. Estos datos serán contrastados para aclarar las características, métodos de elaboración de mezclas, influencia en la capacidad de sellado y propiedades mecánicas del hormigón con la finalidad de crear una pauta de posibles alternativas de investigación y uso en el Ecuador.

Dentro de las tendencias de investigación actuales se puede resaltar que las mezclas de distintos materiales y sustancias con fibras es a lo que se está apuntando, debido a que estas mezclas pueden lograr distintos resultados en las muestras, ya sea en las propiedades mecánicas de las mismas como en sus propiedades de curación. A más de esto también se puede mencionar que aun cuando el uso de fibras dentro de los hormigones no es reciente, se ha visto que no existe un solo alineamiento acerca de que pruebas se puede utilizar para analizar la reparación ni las condiciones en las que se analizarán las muestras.

En la Tabla 2 se puede ver un resumen de las características tanto de fibras como materiales o sustancias adicionales utilizados en los artículos en mención en las que, a pesar de que su objetivo principal es verificar el impacto de los mismos en la resistencia, reparación y durabilidad del hormigón, no necesariamente en todos se detalla las características principales de los materiales.

Tabla 2 Características de la fibra y sustancias adicionales

Compuesto	Artículo	Tipo de Fibra	Adicionales		Características de la fibra					
			Sustancia adicional	Cant.	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Porcentaje (%)	Tensión (MPa)	Módulo de elasticidad (MPa)	Índice de absorción
FIBRA	Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete	Ultra Fiber 500	-	-	2.1	0.016	0.5	750	8500	85%
	The Self-Sealing Capacity of Environmentally Friendly, Highly Damped, Fibre-Reinforced Concrete	Duras S500	Caucho granulado	5%	48	0.7	0.1-0.4	470	6000	-
	Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites	Macrofilamento	-	-	50	0.05	0-2	550	7500	-
		Microfibra	-	-	12	0.018		300-450	7000	-
	Comparative Study of Coconut and Corn Fibers as Aggregate in Concrete	Coco	-	-	-	-	0.5	-	-	-
		Maíz	-	-	-	-	0.5	-	-	-
	The effect of using date palm waste fibers in plain concrete mixture by comparing three pre-treatment techniques	Palma de dátiles	-	-	60	-	0-0.8	-	-	-
	Effects of basalt fiber reinforced polymer minibars on the flexural behavior of pre-cracked UHPC after chloride induced corrosion	Basalto	-	-	12	0.44	3	1300	43000	-
		Acero	-	-	12	0.2	3	2200	200000	-
	Improvement in the strength of concrete reinforced with agriculture fibers: Assessment on mechanical properties and microstructure analysis	Cáñamo	-	-	6-18	-	-	900	34000	85-105%
Coco		-	-	-	-	-	175	4000-6000	130-180%	
Banana		-	-	-	-	-	539-754	9000-16000	-	
Yute		-	-	-	-	-	350-550	13000-22400	-	
Paja de arroz		-	-	-	-	-	450	-	-	

FIBRA Y CENIZA	Mechanical and microstructure properties of cassava peel ash-based kenaf bio-fibrous concrete composites	Biofibra de kenaf	Ceniza de cáscara de yuca	10%	50	0.0654	0.5	704	39770	-
	Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Organic Waste Ash	Acero	Ceniza de arveja, madera de roble y almendro, residuos animales	15%	35	0.05	1	-	-	-
	Enhancing the Strength Properties of Concrete Using Coconut Fiber and Coconut Fiber Ash	Coco	Ceniza de coco	0-15%	-	-	3	-	-	-
	Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through cementitious matrix optimization and crack width controlling	Polietileno de peso molecular ultra alto	-	-	12	0.217	2	-	115000	-
	Effect of silica fume on fracture analysis, durability performance and embodied carbon fiber-reinforced self-healed concrete	PVA	Humo de sílica	7.50%	6-12	0.04	0.5	-	-	-
FIBRA Y BACTERIAS	Self-repairing of concrete cracks by using bacteria and basalt fiber	Basalto	Bacillus Subtilis	-	12	-	-	3200-3850	93000	-
	Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV	Ultra Fiber 500	Bacillus Subtilis	-	2.1	0.016	0.5	750	-	-
	Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete	Polipropileno	Bacteria resistente a los alcalis de anhídrido carbónico	-	6 y 9	0.038	1.5	358	3500	-
		PVA			6	0.015	1.5	1419	37400	-
Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)	Polipropileno	Bacillus Alkalophilus	-	6	0.038	1.5	-	3500	-	

	Self-healing assessment and variability in plain and recycled tyre fiber reinforced concrete based on tensile splitting test	Acero	-	-	33.2	0.3	-	-	-	-
	Depth-dependent self-healing capacity and mechanism of cracked fiber-reinforced concrete by bacterial community	Polímero	Bacterias solas: Sporosarcina Pasteurii Comunidades bacterianas : Aeróbicas, desnitrificantes, reductoras de sulfato	1X10 ⁹ bacterias/ml 1X10 ⁹ bacterias/ml	-	-	1.5	-	-	-
	Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes	Ultra Fiber 500	Lysinibacillus Sphaericus	-	2.1	0.018	0.45	900	-	-
FIBRAS Y MEZCLAS CRYSTALINAS	Fracture toughness parameters to assess crack healing capacity of fiber reinforced concrete under repeated cracking-healing cycles	Acero	Mezcla cristalina	0.81%	60	0.92	11.11	-	-	-
	Experimental investigation on self healing of fibre reinforced concrete	Nylon	Cenizas volantes Mezcla cristalina	15% 1.10%	-	-	0.5-1.5	-	-	-
FIBRAS, CENIZAS Y BACTERIAS	Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete	Lino	Bacillus Subtilis	13 L/m3	25	0.04	0.31	-	-	-
		Coco	Bacteria Cohnii	13 L/m3	25	0.2-0.74	1.19	-	-	-
		Yute	Bacteria Sphaericus	13 L/m3	25	0.06	0.39	-	-	-

	Coupling behavior of antigenous and antonomous self-healing techniques for durable concrete	PVA	Bacillus Subtilis	1.8x10 ⁸ células/ml	9	0.04	1-2	1320	-	-
FIBRAS Y NANOPARTÍCULAS	Multi-functional cementitious composites with sensing and healing capabilities	Carbono	Nanotubos de carbono	0.25-0.5%	6	0.0072	0.5-1%	4137	-	-
	Effects of Alumina Nanofibers and Cellulose Nanocrystals on Durability and Self-Healing Capacity of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes	Acero Azichem Readymix 200	Mezcla cristalina Penetro Admix	0.80%	20	0.22	1.5	-	-	-
		Nanofibras de alúmina	0.25%							
		Nanocris- tales de celulosa	0.15%							

Actualmente existen varios compuestos fabricados como fibras que se distribuyen en el mercado siendo ya normados y estandarizados, los mismos que ya han sido investigados a profundidad por las distintas marcas que los comercializan y por lo tanto permiten una mayor confiabilidad al compararlos mezclados con otras sustancias. La longitud de las fibras es una característica importante en el desarrollo de estas investigaciones debido a que Garg & Azarsa, (2021) comprobaron que mientras más largas estas sean resistirán mayores fuerzas de tracción y compresión. Se debe mencionar también que este parámetro afecta a la trabajabilidad de los materiales ya que a menor longitud de fibra esta propiedad será mejor. Por lo que es fundamental verificar que se utilice una buena relación agua cemento (w/c) en la dosificación de las muestras.

El solo hecho de utilizar fibras ocasiona que la trabajabilidad disminuya debido a que se dificulta más la integración de los elementos en la mezcla. Sin embargo, el grado de dificultad en el mezclado dependerá a su vez de la forma, estado de permeabilidad, cantidad y dosificación con la que se utilicen las fibras. A más de esto es importante mencionar que las características hidrófilas de ciertas fibras pueden generar que sea indispensable el uso de ciertos plastificantes ya que tienen gran absorción de agua de mezcla.

Las fibras de acero usualmente son usadas como macrofibras debido a su capacidad de puenteo y adherencia con el hormigón, por lo que generalmente se ve que los autores tienden a emplearlas en tamaños superiores a los 20mm. También se puede observar que no existe ninguna tendencia para la selección de longitud de las fibras ya que tanto las fibras orgánicas como inorgánicas varían su tamaño entre macro y microfibras.

Las microfibras son fibras monofilamento muy livianas de tamaño hasta 20mm que se usan generalmente para evitar el agrietamiento en estado fresco del hormigón mientras que las macrofibras son de tamaño y diámetro mayor que se usan regularmente para mejorar el enlace entre las caras de las fisuras en el hormigón (Garg & Azarsa, 2021).

El diámetro de las fibras también afecta a la capacidad de recubrimiento de las mismas por otras sustancias, mediante microscopías de barrido electrónico SEM se pudo observar que el estado superficial de las fibras ocasiona ciertas porosidades, y que incluso la dirección en la que se encuentra ubicada la fibra con respecto a la grieta puede mejorar o no la reparación de la misma.

El porcentaje de uso de fibras es esencial dentro del estudio de muestras ya que se ha visto que es un valor muy sensible en la afectación de las propiedades mecánicas y autorreparativas del hormigón. Incluso una pequeña variación del 0.25% de uso de la misma fibra bajo las mismas condiciones de prueba puede ocasionar que la resistencia de la muestra varíe. A más de esto se debe tener en cuenta que si existe la mezcla con otras sustancias estas también afectarán a estas propiedades y a la cantidad y relación agua/cemento que se debe utilizar.

En el uso de sustancias adicionales se puede destacar que las tendencias demuestran que las bacterias han sido más investigadas en los últimos años, pero cabe mencionar que en los artículos leídos las comunidades bacterianas han tenido un mejor comportamiento ante la reparación que las bacterias de un solo tipo. Esto se da ya que, las comunidades bacterianas al ser una mezcla de bacterias tanto aerobias como anaerobias funcionan como medio transportador de hidróxido de calcio a lo largo de la profundidad de la grieta. A más de esto aportan a reducir la generación de sustancias dañinas para el hormigón.

Elaboración.

En la Tabla 3 se describirán los procesos de elaboración del hormigón, incluyendo el orden en el cual se colocarán los materiales, el tratamiento que se dará a las fibras y sustancias adicionales para poder incorporarlas a la mezcla de hormigón y algunas observaciones a tener en cuenta durante el proceso.

Tabla 3 Proceso de elaboración de muestras

Compuesto	Proceso de elaboración	Observaciones
Fibra	<ul style="list-style-type: none"> •Sumergir las fibras en el porcentaje de agua necesario de acuerdo a sus características hidrófilas. •Mezclar la arena con la grava, posteriormente añadir el cemento, agua y la solución de agua con fibras. •Vertido en el molde (de acuerdo a pruebas a realizarse) •Reposo por 24h a temperatura ambiente •Desmolde y curado de acuerdo a condiciones requeridas 	<p>Importancia de la cantidad de fibras (porcentaje en relación al peso del cemento) y su tamaño.</p>
Fibra y ceniza	<ul style="list-style-type: none"> •Sumergir las fibras en el porcentaje de agua necesario de acuerdo a sus características hidrófilas •Realizar un tamizado de las cenizas para eliminar impurezas • Mezclar la arena con la grava y las cenizas, posteriormente añadir el cemento, el agua y la solución de agua con fibras. •Vertido en el molde (de acuerdo a pruebas a realizarse) •Reposo por 24h a temperatura ambiente •Desmolde y curado de acuerdo a condiciones requeridas 	<p>Verificar la cantidad de cenizas volantes (sílice, silicato de calcio o calcio) en relación con los agregados finos.</p>
Fibra y bacterias	<ul style="list-style-type: none"> •Esterilizar el medio de incubación de las bacterias •Sumergir las bacterias en medio de incubación y dejarlas crecer el tiempo necesario de acuerdo al tipo de bacteria •Sumergir las fibras en la solución bacteriana • Mezclar la arena con la grava, posteriormente añadir el cemento, el agua y la solución bacteriana con fibras. •Vertido en el molde (de acuerdo a pruebas a realizarse) •Reposo por 24h a temperatura ambiente •Desmolde y curado de acuerdo a condiciones requeridas 	<p>Verificar el tipo de bacteria para seleccionar de manera adecuada los componentes de la solución de incubación</p>

Fibras y mezclas cristalinas	<ul style="list-style-type: none"> • Sumergir las fibras en el porcentaje de agua necesario de acuerdo a sus características hidrófilas • Mezclar la arena con la grava, posteriormente añadir el cemento, la solución de agua con fibras y el agua incluyendo en el porcentaje de agua las mezclas cristalinas • Vertido en el molde (de acuerdo a pruebas a realizarse) • Reposo por 24h a temperatura ambiente • Desmolde y curado de acuerdo a condiciones requeridas 	Verificar la cantidad de agua con la que se trabajaran las mezclas cristalinas ¹ (mezcla de cemento, arena y sílice activo)
Fibras y nanopartículas	<ul style="list-style-type: none"> • Sumergir las fibras en el porcentaje de agua necesario de acuerdo a sus características hidrófilas • Sumergir los nanocomponentes en agua y plastificante • Mezclar la arena con la grava, posteriormente añadir el cemento y agua, incluyendo las fibras anteriormente sumergidas y la mezcla de agua y nanocomponentes • Vertido en el molde (de acuerdo a pruebas a realizarse) • Reposo por 24h a temperatura ambiente • Desmolde y curado de acuerdo a condiciones requeridas 	Utilizar nanocomponentes con plastificantes para asegurar su correcta dispersión

Para la elaboración de muestras de hormigón es importante tener en cuenta los materiales o sustancias que van a incluirse en la misma. Las fibras de acuerdo a su origen requerirán el uso de más o menos agua en la dosificación, de igual manera el uso de cenizas o nanocápsulas tendrán requerimientos específicos para asegurar su correcta mezcla y dispersión en la muestra.

Dependiendo de la adición, esta se realizará en un momento específico del mezclado de hormigón, pero generalmente se lo realizará de acuerdo a las normas vigentes. Como se puede ver en la Tabla 3, las fibras y sustancias por lo general se adicionan a los compuestos líquidos del hormigón ya sea en agua, plastificante o formando soluciones bacterianas, los cuales se colocarán posterior a la mezcla de todos los materiales secos. Esto se debe a que de cierto modo los líquidos sirven como medio transportador y de recubrimiento de las fibras.

Con la finalidad de evitar la formación de poros y para asegurar la correcta distribución de componentes generalmente utiliza una mesa vibratoria de forma que las muestras sean lo más normalizadas posible. A más de esto para cuidar la humedad durante el tiempo de fraguado se colocan películas plásticas cubriendo todo el molde.

Cabe resaltar que la única diferencia en el método de elaboración de mezclas con el uso de fibras es el tratamiento que se dará a los componentes adicionales con los que fueron

¹ Mezclas cristalinas son sustancias que reaccionan con los componentes del cemento y forman hidratos de silicato de calcio, los cuales se utilizan para reducir porosidades y por ende la permeabilidad del hormigón.

estudiadas las muestras y la cantidad de líquidos, la cual dependerá de las características hidrófilas y resistentes de estas sustancias.

Ensayos y resultados

Amran et al. (2022) destaca que la autorreparación se puede evaluar de tres formas: mediante inspección visual del sellado de la fisura y por la identificación de los componentes de recuperación que causan mejoras en la durabilidad y recuperación de las propiedades de resistencia.

Existe un sinnúmero de ensayos que se han realizado en los artículos de referencia con la finalidad de determinar las propiedades autorreparadoras del hormigón con fibras, siguiendo las normativas existentes para la toma y ensayo de muestras, el autor a su discreción a determinado el número de muestras, el tiempo de curado, las condiciones de curado, los ensayos relevantes a su criterio, que parámetros analizará, entre otros.

Como ensayos de inspección visual se han realizado Microscopías de barrido electrónico SEM, rayos X y verificaciones de sellado superficial de la fisura. Las microscopías han permitido ver el comportamiento de las fibras en relación a la fisura, como estas sirven de puente para evitar un mayor agrietamiento y a su vez, como con el paso se van creando calcificaciones en el contorno de la misma sellando la fisura.

La difracción de rayos x por otro lado permite visualizar la composición química en la grieta y la presencia de partículas de calcita posterior al curado. La verificación de sellado superficial es una inspección netamente visual en la que se comprueba si la grieta se ha sellado completamente o no posterior al tiempo definido. Al ser visuales no permiten determinar la resistencia y por ende durabilidad de las muestras posterior al sellado, sino que únicamente muestran si el material ha sido capaz de repararse.

Propiedades mecánicas.

La durabilidad del hormigón está netamente relacionada a sus propiedades mecánicas ya que no tendría sentido mantener una estructura en uso si únicamente se ve en buen estado, pero no está presta para resistir cualquier tipo de sollicitación o esfuerzo al que se pueda ver sometido durante su vida útil (Deeba & Ammasi, 2024). Esto debido a que una de las ventajas del uso del hormigón armado en regiones de alta sismicidad es precisamente que su falla sea dúctil, es decir que advierta su posible falla antes de poner en riesgo la vida de sus usuarios.

Resistencia a la compresión.

Los ensayos de compresión, tracción y flexión son primordiales para determinar esta durabilidad del hormigón después de reparado ya que estos esfuerzos serán los principales a los que se verá sometida cualquier tipo de estructura. Cabe mencionar que, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se ha comparado las resistencias a la compresión

encontradas por los autores en muestras de control elaboradas bajo los mismos parámetros que las mezclas con fibras y sustancias adicionales.

Tabla 4 Resistencia a la compresión de hormigones autorreparables con fibras

Compuesto	Artículo	Tipo de Fibra	Adicionales		Compresión		
			Sustancia adicional	Cant.	Relación con muestra de control	% de resistencia mayor o menor	Cant. de fibra (%)
FIBRA	Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete	Ultra Fiber 500	-	-	↓	-25.59	-
	The Self-Sealing Capacity of Environmentally Friendly, Highly Damped, Fibre-Reinforced Concrete	Duras S500	Caucho granulado	5%	↓	-30.66	0.1
	Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites	Macrofilamento	-	-	↑	+39	1.25
		Microfibra	-	-	↑	+41	0.3
	Comparative Study of Coconut and Corn Fibers as Aggregate in Concrete	Coco	-	-	↓	-2.15	0.5
		Maíz	-	-	↑	+23.74	0.5
	The effect of using date palm waste fibers in plain concrete mixture by comparing three pre-treatment techniques	Palma de dátiles	-	-	↑	-	-
Effects of basalt fiber reinforced polymer minibars on the flexural behavior of pre-cracked UHPC after chloride induced corrosion	Basalto	-	-	↑	+9.52	3	
	Acero	-	-	↑	+9.52	3	
Improvement in the strength of concrete reinforced with agriculture fibers: Assessment on mechanical properties and microstructure analysis	Cáñamo	-	-	↑	-	1-3	
	Coco	-	-	↑	-	1-2	
	Banana	-	-	↑	-	0.5-1	
	Yute	-	-	↑	-	0.1	
	Paja de arroz	-	-	↑	-	0.5	
FIBRA Y CENIZA	Mechanical and microstructure properties of cassava peel ash-based kenaf bio-fibrous concrete composites	Biofibra de kenaf	Ceniza de cáscara de yuca	10%	↓	-11	0.25-1
	Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Organic Waste Ash	Acero	Ceniza de arveja, madera de roble y almendro, residuos animales	15%	↓	-12	-
	Enhancing the Strength Properties of Concrete Using Coconut Fiber and Coconut Fiber Ash	Coco	Ceniza de coco	0-15%	↓	-24	-

	Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through cementitious matrix optimization and crack width controlling	Polietileno de peso molecular ultra alto	-	-	-	-	-	
	Effect of silica fume on fracture analysis, durability performance and embodied carbon fiber-reinforced self-healed concrete	PVA	Humo de sílica	7.50%	-	-	-	
FIBRA Y BACTERIAS	Self-repairing of concrete cracks by using bacteria and basalt fiber	Basalto	Bacillus Subtilis	-	↑	+27	-	
	Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV	Ultra Fiber 500	Bacillus Subtilis	-	↓	-6.97	0.5	
	Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete	Polipropileno PVA	Bacteria resistente a los alcalis de anhídrido carbónica	-	-	-	-	
	Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)	Polipropileno	Bacillus Alcalophilus	-	-	-	-	
	Self-healing assessment and variability in plain and recycled tyre fiber reinforced concrete based on tensile splitting test	Acero	-	-	↓	-	-	
	Depth-dependent self-healing capacity and mechanism of cracked fiber-reinforced concrete by bacterial community	Polímero	Bacterias solas: Sporosarcina Pasteurii Comunidades bacterianas : Aeróbicas, desnitrificantes, reductoras de sulfato	1X10 ⁹ bacterias/ml 1X10 ⁹ bacterias/ml	-	-	-	-
	Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes	Ultra Fiber 500	Lysinibacillus Sphaericus	-	↑	-	-	
FIBRAS Y MEZCLAS CRISTALINAS	Fracture toughness parameters to assess crack healing capacity of fiber reinforced concrete under repeated cracking-healing cycles	Acero	Mezcla cristalina	0.81%	-	-	-	
	Experimental investigation on self healing of fibre reinforced concrete	Nylon	Cenizas volantes	15%	↑	+82.68	1.5	

			Mezcla cristalina	1.10%			
FIBRAS, CENIZAS Y BACTERIAS	Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete	Lino	Bacillus Subtilis	13 L/m3	↑	+61	-
		Coco	Bacteria Cohnii	13 L/m3			
		Yute	Bacteria Sphaericus	13 L/m3			
	Coupling behavior of antigenous and antonomous self-healing techniques for durable concrete	PVA	Bacillus Subtilis	1.8x10 ⁸ células/ml	↓	-	-
FIBRAS Y NANOPARTICULAS	Multi-functional cementitious composites with sensing and healing capabilities	Carbono	Nanotubos de carbono	0.25-0.5%	↑	-	-
	Effects of Alumina Nanofibers and Cellulose Nanocrystals on Durability and Self-Healing Capacity of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes	Acero Azichem Readymix 200	Mezcla cristalina Penetro Admix	0.80%	-	-	-
		Nanofibras de alúmina	0.25%				
		Nanocristales de celulosa	0.15%				

Nota: Muestra de control es aquella fabricada para una cierta resistencia y la cual no posee contenido de fibras ni otras sustancias adicionales. La flecha ↑ muestra que la resistencia obtenida después de la reparación de la fisura es mayor que la resistencia de la muestra de control en estado pre-dañado, ↓ indica que la resistencia después de la reparación de la fisura es menor que la muestra de control pre-dañada. Así mismo los porcentajes de resistencia son referentes a la comparación con la muestra de control y la cantidad de fibra hace referencia a la cantidad de fibra que tuvo la muestra sobre la que se hace mención

Como se puede ver la mayor parte de los investigadores ha profundizado en la resistencia a la compresión, esto debido a que es la propiedad fundamental del hormigón, por lo que resulta interesante que aún a pesar de ello existan investigaciones en las cuales la resistencia a la compresión no se ha recuperado posterior a la fisura, lo que se podría dejar en duda si aún con esta disminución el hormigón resistirá lo suficiente como para ser funcional bajo los requerimientos de diseño.

Se puede ver también que el uso de fibras con cenizas volantes no ayuda a la recuperación de la resistencia a compresión, sin embargo llama la atención que al verificar los resultados obtenidos por Rauf et al., (2020) se ve que el uso de fibras con adición de cenizas volantes más bacterias mejoran esta característica mecánica post-reparación. Esta diferencia se puede deber a que las bacterias forman parte de la dosificación de estas probetas.

La fibra de celulosa Ultra Fiber 500 a su vez llama la atención debido a que en las investigaciones en las que se las utilizó sola o con bacterias Bacillus Subtilis disminuyó su resistencia a la compresión, mientras que con bacterias Lysiniccilus Sphaericus subió aun cuando ambas son bacterias aeróbicas, por lo que se puede evidenciar que la presencia de agregados gruesos puede permitir un diferente comportamiento en las mezclas, lo que evidencia que no

necesariamente se obtendrán los mismos resultados entre morteros y hormigones así sean netamente comparativos con muestras de control de la misma mezcla.

En la mayoría de investigaciones se puede ver que con el uso de fibras orgánicas se genera un aumento en la resistencia a la compresión de las muestras a excepción de las utilizadas con adición de cenizas volantes, lo que puede representar que las cenizas volantes no tienen un buen comportamiento a esta propiedad mecánica. Según Agudelo & Esponisa (2017) esto se puede deber a que mientras mayor es el porcentaje de reemplazo de cenizas volantes por cemento su resistencia disminuye.

Otro resultado interesante es que casi todos los documentos en los que se analizan fibras comerciales muestran reducción en su capacidad de recuperación de resistencia a la compresión, lo que podría ser por un posible mal uso de las mismas, ya que al ser materiales comerciales están estandarizados y verificados ante condiciones específicas a las que se deben trabajar y no necesariamente se repitieron los mismos patrones en los ensayos realizados.

Resistencia a la flexión.

En la Tabla 5 se puede comprobar los resultados encontrados por los diversos autores del comportamiento de fibras y mezclas de fibras con sustancias adicionales a la flexión. El acero de refuerzo generalmente es quien contribuye a mejorar esta propiedad en el hormigón armado, por lo que los resultados podrían sugerir posibles materiales que aporten al desarrollo de esta característica del hormigón.

Tabla 5 Resistencia a la flexión de hormigones autorreparables con fibras

Compuesto	Artículo	Tipo de Fibra	Adicionales		Relación con muestra de control	Flexión	
			Sustancia adicional	Cant.		% de resistencia mayor o menor	Cant. de fibra (%)
FIBRA	Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete	Ultra Fiber 500	-	-	↑	+44.37	-
	The Self-Sealing Capacity of Environmentally Friendly, Highly Damped, Fibre-Reinforced Concrete	Duras S500	Caucho granulado	5%	↓	-	0.4
	Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites	Macrofilamento	-	-	-	-	-
		Microfibra	-	-	-	-	-
	Comparative Study of Coconut and Corn Fibers as Aggregate in Concrete	Coco Maíz	-	-	-	-	-
The effect of using date palm waste fibers in plain concrete mixture by comparing three pre-treatment techniques	Palma de dátiles	-	-	-	-	-	

	Effects of basalt fiber reinforced polymer minibars on the flexural behavior of pre-cracked UHPC after chloride induced corrosion	Basalto			-	-	-
		Acero			-	-	-
	Improvement in the strength of concrete reinforced with agriculture fibers: Assessment on mechanical properties and microstructure analysis	Cáñamo			↑	-	1-3
		Coco			↑	-	0.5-1
		Banana	-	-	↑	-	0.5-1
		Yute			↑	-	0.1-0.5
	Paja de arroz			↓	-	0-3	
FIBRA Y CENIZA	Mechanical and microstructure properties of cassava peel ash-based kenaf bio-fibrous concrete composites	Biofibra de kenaf	Ceniza de cáscara de yuca	10%	↑	+19	0.5
	Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Organic Waste Ash	Acero	Ceniza de arveja, madera de roble y almendro, residuos animales	15%	↑	+110	-
	Enhancing the Strength Properties of Concrete Using Coconut Fiber and Coconut Fiber Ash	Coco	Ceniza de coco	0-15%	-	-	-
	Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through cementitious matrix optimization and crack width controlling	Polietileno de peso molecular ultra alto			-	-	-
	Effect of silica fume on fracture analysis, durability performance and embodied carbon fiber-reinforced self-healed concrete	PVA	Humo de sílica	7.50 %	-	-	-
	FIBRA Y BACTERIAS	Self-repairing of concrete cracks by using bacteria and basalt fiber	Basalto	Bacillus Subtilis	-	↑	-
Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV		Ultra Fiber 500	Bacillus Subtilis	-	-	-	-
Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete		Polipropileno	Bacteria resistente a los alcalis de anhídrido carbónica	-	↑	-	-
		PVA					
Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)	Polipropileno	Bacillus Alcalophilus	-	↑	+32	-	

	Self-healing assessment and variability in plain and recycled tyre fiber reinforced concrete based on tensile splitting test	Acero	-	-	-	-	-		
	Depth-dependent self-healing capacity and mechanism of cracked fiber-reinforced concrete by bacterial community	Polímero	Bacterias solas: 1X10 ⁹	Sporosarcina Pasteurii bacterias/ml	Comunidades bacterianas: 1X10 ⁹	Aeróbicas, desnitrificantes, reductoras de sulfato bacterias/ml	-	-	-
	Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes	Ultra Fiber 500	Lysinibacillus Sphaericus	-	-	-	-	-	
FIBRAS Y MEZCLAS CRISTALINAS	Fracture toughness parameters to assess crack healing capacity of fiber reinforced concrete under repeated cracking-healing cycles	Acero	Mezcla cristalina	0.81 %	-	-	-		
	Experimental investigation on self healing of fibre reinforced concrete	Nylon	Cenizas volantes	15%	-	-	-		
FIBRAS, CENIZAS Y BACTERIAS	Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete	Lino	Bacillus Subtilis	13 L/m3	-	-	-		
		Coco	Bacteria Cohnii	13 L/m3					
	Yute	Bacteria Sphaericus	13 L/m3						
	Coupling behavior of antigenous and antonomous self-healing techniques for durable concrete	PVA	Bacillus Subtilis	1.8x10 ⁸ células/ml	↓	-	-		
FIBRAS Y NANOPARTÍCULAS	Multi-functional cementitious composites with sensing and healing capabilities	Carbono	Nanotubos de carbono	0.25-0.5%	↑	-	-		
	Effects of Alumina Nanofibers and Cellulose Nanocrystals on Durability and Self-Healing Capacity of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes	Acero Azichem Readymix 200	Mezcla cristalina Penetro Admix	0.80 %	-	-	-		
			Nanofibras de alúmina	0.25 %					
			Nanocris-tales de celulosa	0.15 %					

Nota: Muestra de control es aquella fabricada para una cierta resistencia y la cual no posee contenido de fibras ni otras sustancias adicionales. La flecha ↑ muestra que la resistencia obtenida después de la reparación de la

fisura es mayor que la resistencia de la muestra de control en estado pre-dañado, ↓ indica que la resistencia después de la reparación de la fisura es menor que la muestra de control pre-dañada. Así mismo los porcentajes de resistencia son referentes a la comparación con la muestra de control y la cantidad de fibra hace referencia a la cantidad de fibra que tuvo la muestra sobre la que se hace mención

En la revisión de resultados del ensayo de flexión se puede evidenciar que el acero es un gran complemento para el hormigón ya que, aun en fibras, permite lograr más del doble de resistencia a la flexión de una muestra sin fibras. Esto se da por el enlace y adherencia entre el hormigón y el acero y la redistribución de esfuerzos a lo largo de sus fibras.

Casi todos los tipos de fibras ya sean de origen natural o no han aumentado la capacidad de resistencia a la flexión una vez reparada la muestra. Feng et al., (2019) descubrió que el PVA tiene menor resistencia a la flexión que el polipropileno, lo que puede ser la razón por la cual esta es de las pocas fibras que disminuye su capacidad en referencia a las mezclas control. La fibra Duras S500 a su vez presenta deficiencia en esta propiedad lo que podría estar reflejado por su módulo de elasticidad, el cual en comparación con otros tipos de fibras resulta ser bajo.

Esta flexión se ve mejorada en la mayoría de investigaciones debido al efecto de puenteo que tienen las fibras dentro del hormigón, permitiendo una mayor absorción de energía y una relajación de los esfuerzos de tracción a lo largo de la fisura. A su vez que la disminución de microfisuras debido a la presencia de las fibras permite mayor soporte ante la presencia de cargas puntuales. Se puede ver que en mezclas con mayor contenido de fibras la resistencia a la flexión aumenta, esto puede ser ya que las fibras son más elásticas permitiendo mayores deformaciones en la zona de fisura.

Resistencia a la tracción.

El hormigón es un material que muestra poca resistencia ante la tracción, lo que lo hace el compañero ideal del acero de refuerzo. Es por esto que es importante encontrar otros materiales alternativos que promuevan la resistencia del hormigón, por lo que el análisis de la resistencia a la tracción de las fibras es fundamental para verificar la durabilidad del hormigón autorreparable.

Tabla 6 Resistencia a la tracción de hormigones autorreparables con fibras

Compuesto	Artículo	Tipo de Fibra	Adicionales		Tracción		
			Sustancia adicional	Cant.	Relación con muestra de control	% de resistencia mayor o menor	Cant. de fibra (%)
FIBRA	Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete	Ultra Fiber 500	-	-	-	-	-
	The Self-Sealing Capacity of Environmentally Friendly, Highly Damped, Fibre-Reinforced Concrete	Duras S500	Caucho granulado	5%	↓	-	0.4

	Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites	Macrofilamento					
		Microfibra	-	-	↑	+33	0.3
	Comparative Study of Coconut and Corn Fibers as Aggregate in Concrete	Coco					
		Maíz	-	-	-	-	-
	The effect of using date palm waste fibers in plain concrete mixture by comparing three pre-treatment techniques	Palma de dátiles	-	-	-	-	-
	Effects of basalt fiber reinforced polymer minibars on the flexural behavior of pre-cracked UHPC after chloride induced corrosion	Basalto					
		Acero	-	-	-	-	-
	Improvement in the strength of concrete reinforced with agriculture fibers: Assessment on mechanical properties and microstructure analysis	Cáñamo			↑	-	1-3
		Coco			↓	-	0-0.5
		Banana	-	-	↑	-	0.5-1
Yute			↑	-	0.5-1.5		
Paja de arroz			↑	-	0.25-0.5		
FIBRA Y CENIZA	Mechanical and microstructure properties of cassava peel ash-based kenaf bio-fibrous concrete composites	Biofibra de kenaf	Ceniza de cáscara de yuca	10%	↑	-	0.5
	Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Organic Waste Ash	Acero	Ceniza de arveja, madera de roble y almendro, residuos animales	15%	↑	+37	-
	Enhancing the Strength Properties of Concrete Using Coconut Fiber and Coconut Fiber Ash	Coco	Ceniza de coco	0-15%	-	-	-
	Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through cementitious matrix optimization and crack width controlling	Poliétileno de peso molecular ultra alto			-	-	-
	Effect of silica fume on fracture analysis, durability performance and embodied carbon fiber-reinforced self-healed concrete	PVA	Humo de sílica	7.50 %	-	-	-
FIBRA Y BACTERIAS	Self-repairing of concrete cracks by using bacteria and basalt fiber	Basalto	Bacillus Subtilis	-	-	-	-
	Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV	Ultra Fiber 500	Bacillus Subtilis	-	-	-	-

	Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete	Polipropileno PVA	Bacteria resistente a los alcalis de anhídrida carbónica	-	-	-	-
	Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)	Polipropileno	Bacillus Alcalophilus	-	-	-	-
	Self-healing assessment and variability in plain and recycled tyre fiber reinforced concrete based on tensile splitting test	Acero	-	-	↓	-16	-
	Depth-dependent self-healing capacity and mechanism of cracked fiber-reinforced concrete by bacterial community	Polímero	Bacterias solas: Sporosarcina Pasteurii Comunidades bacterianas : Aeróbicas, desnitrificantes, reductoras de sulfato	1X10 ⁹ bacterias/ml 1X10 ⁹ bacterias/ml	↑	+22.01	-
	Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes	Ultra Fiber 500	Lysinibacillus Sphaericus	-	↑	+25	-
FIBRAS Y MEZCLAS CRISTALINAS	Fracture toughness parameters to assess crack healing capacity of fiber reinforced concrete under repeated cracking-healing cycles	Acero	Mezcla cristalina	0.81 %	-		
	Experimental investigation on self healing of fibre reinforced concrete	Nylon	Cenizas volantes Mezcla cristalina	15% 1.10 %	↑	+63.98	1.5
FIBRAS, CENIZAS Y BACTERIAS	Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete	Lino Coco Yute	Bacillus Subtilis Bacteria Cohnii Bacteria Sphaericus	13 L/m ³ 13 L/m ³ 13 L/m ³	-	-	-
	Coupling behavior of antigenous and antonomous self-healing techniques for durable concrete	PVA	Bacillus Subtilis	1.8x10 ⁸ células/ml	-	-	-

FIBRAS Y NANOPARTÍCULAS	Multi-functional cementitious composites with sensing and healing capabilities	Carbono	Nanotubos de carbono	0.25-0.5%	-	-	-
	Effects of Alumina Nanofibers and Cellulose Nanocrystals on Durability and Self-Healing Capacity of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes	Acero Azichem Readymix 200	Mezcla cristalina Penetro Admix	0.80 %	-	-	-
			Nanofibras de alúmina	0.25 %			
			Nanocristales de celulosa	0.15 %			

Nota: Muestra de control es aquella fabricada para una cierta resistencia y la cual no posee contenido de fibras ni otras sustancias adicionales. La flecha ↑ muestra que la resistencia obtenida después de la reparación de la fisura es mayor que la resistencia de la muestra de control en estado pre-dañado, ↓ indica que la resistencia después de la reparación de la fisura es menor que la muestra de control pre-dañada. Así mismo los porcentajes de resistencia son referentes a la comparación con la muestra de control y la cantidad de fibra hace referencia a la cantidad de fibra que tuvo la muestra sobre la que se hace mención

La resistencia a la tracción a su vez se ve mejorada en muchos de los artículos con presencia de fibras a excepción de las de acero. Esto llama la atención debido a que el acero tiene un gran comportamiento a la tracción el cual normalmente compensa la fragilidad del hormigón a esta sollicitación.

Los resultados también muestran que para mezclas con más de 0.2% de fibras esta propiedad mecánica tiene mejor comportamiento, a excepción de con el uso de Duras 500. Al verificar los hallazgos de las otras propiedades mecánicas se ve que el uso de fibras permitió el incremento de resistencias en porcentajes muy altos mientras que en esta propiedad únicamente un ensayo sobrepasó el 50% de mejora.

Se puede ver también que las fibras orgánicas muestran una mejora en la resistencia a tracción, a excepción de las fibras de coco, sin importar el tamaño de la fibra que se use en la muestra. Esto es interesante debido a que según Garg & Azarsa (2021) las microfibras no aportan a la tracción debido a la poca superficie de adherencia, lo que se contrasta en estos resultados.

En síntesis, el contenido de fibras y sustancias adicionales no necesariamente aporta a todas las características de durabilidad del hormigón, pero teniendo en cuenta que cada estructura tiene una funcionalidad en específico y puede estar sometida a esfuerzos críticos, estos pueden ser solventados mediante la correcta selección de materiales que aporten a la autorreparación.

Reparación de fisuras

En la Tabla 7 se detalla la capacidad de sellado superficial mediante inspección visual de las fibras analizadas en los artículos seleccionados, la misma que se describirá con simbología acorde al porcentaje de cierre de la fisura.

Tabla 7 Inspección visual de reparación de fisuras

Compuesto	Artículo	Tipo de Fibra	Adicionales		Inspección Visual		
			Sustancia adicional	Cant.	Sellado	Tiempo (días)	% Fibra
FIBRA	Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete	Ultra Fiber 500	-	-	-	-	-
	The Self-Sealing Capacity of Environmentally Friendly, Highly Damped, Fibre-Reinforced Concrete	Duras S500	Caucho granulado	5%	T	56	0.1-0.2
	Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites	Macrofilamento Microfibra	-	-	T	-	-
	Comparative Study of Coconut and Corn Fibers as Aggregate in Concrete	Coco Maíz	-	-	-	-	-
	The effect of using date palm waste fibers in plain concrete mixture by comparing three pre-treatment techniques	Palma de dátiles	-	-	-	-	-
	Effects of basalt fiber reinforced polymer minibars on the flexural behavior of pre-cracked UHPC after chloride induced corrosion	Basalto Acero	-	-	-	-	-
	Improvement in the strength of concrete reinforced with agriculture fibers: Assessment on mechanical properties and microstructure analysis	Cáñamo Coco Banana Yute Paja de arroz	-	-	-	-	-
FIBRA Y CENIZA	Mechanical and microstructure properties of cassava peel ash-based kenaf bio-fibrous concrete composites	Biofibra de kenaf	Ceniza de cáscara de yuca	10%	-	-	-
	Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Organic Waste Ash	Acero	Ceniza de arveja, madera de roble y almendro, residuos animales	15%	-	-	-
	Enhancing the Strength Properties of Concrete Using Coconut Fiber and Coconut Fiber Ash	Coco	Ceniza de coco	0-15%	-	-	-
	Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through	Polietileno de peso molecular ultra alto	-	-	T	28	2

	cementitious matrix optimization and crack width controlling						
	Effect of silica fume on fracture analysis, durability performance and embodied carbon fiber-reinforced self-healed concrete	PVA	Humo de sílica	7.50 %	T	56	0.5
FIBRA Y BACTERIAS	Self-repairing of concrete cracks by using bacteria and basalt fiber	Basalto	Bacillus Subtilis	-	-	-	-
	Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar: Self-healing quantification using UPV	Ultra Fiber 500	Bacillus Subtilis	-	-	-	-
	Coupled effect of PP fiber, PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete	Polipropileno PVA	Bacteria resistente a los alcalis de anhídrida carbónica	-	P	28	1.5
	Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS)	Polipropileno	Bacillus Alcalophilus	-	T	28	1.5
	Self-healing assessment and variability in plain and recycled tyre fiber reinforced concrete based on tensile splitting test	Acero	-	-	-	-	-
	Depth-dependent self-healing capacity and mechanism of cracked fiber-reinforced concrete by bacterial community	Polímero	Bacterias solas: Sporosarcina Pasteurii Comunidad bacterianas : Aeróbicas, desnitrificantes, reductoras de sulfato	1X10 ⁹ bacterias/ml	T	28	1.5
				1X10 ⁹ bacterias/ml	P	28	1.5
Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes	Ultra Fiber 500	Lysinibacillus Sphaericus	-	T	30	0.45	
FIBRAS Y MEZCLAS CRISTALINAS	Fracture toughness parameters to assess crack healing capacity of fiber reinforced concrete under repeated cracking-healing cycles	Acero	Mezcla cristalina	0.81 %	-	-	-
	Experimental investigation on self healing of fibre reinforced concrete	Nylon	Cenizas volantes	15%	P	28	0.5-1.5

			Mezcla cristalina	1.10 %			
FIBRAS, CENIZAS Y BACTERIAS	Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete	Lino	Bacillus Subtilis	13 L/m3	T	28	0.31 ²
		Coco	Bacteria Cohnii	13 L/m3	P	28	1.19 ³
Yute		Bacteria Sphaericus	13 L/m3	T	28	0.06 ⁴	
	Coupling behavior of antogenous and antonomous self-healing techniques for durable concrete	PVA	Bacillus Subtilis	1.8x10 ⁸ células/ml	T	28	1-2
FIBRAS Y NANOPARTÍCULAS	Multi-functional cementitious composites with sensing and healing capabilities	Carbono	Nanotubos de carbono	0.25-0.5%	-	-	-
	Effects of Alumina Nanofibers and Cellulose Nanocrystals on Durability and Self-Healing Capacity of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes	Acero Azichem Readymix 200	Mezcla cristalina Penetro Admix Nanofibras de alúmina Nanocristales de celulosa	0.80 % 0.25 % 0.15 %	-	-	-

Nota: N representa un sellado superficial entre 0-40%, P representa un sellado entre 40-90% y T representa del 90-100%.

Como se puede observar en la Tabla 7 no todos los autores hacen referencia a los resultados físicos obtenidos en torno a la autorreparación del hormigón y tampoco existe un período de tiempo fijo en el que se pueda asumir que el sellado de la fisura no incrementará.

Los resultados muestran que el uso únicamente de fibras como agente curador puede permitir el sellado completo de la fisura, esto se puede deber a que, como se hacía mención anteriormente, las fibras pueden actuar como agentes de curación autógenos y autónomos. Al evitar la propagación de fisuras y gracias a su acción de puenteo reduce el tamaño inicial de fisura permitiendo así que esta se selle de forma más rápida (Huang et al., 2020).

Resulta interesante destacar que las fibras adicionadas con bacterias han sido más estudiadas al respecto de su potencial de reparación, lo que puede ser debido a la capacidad que tienen las bacterias de convertir el lactato de calcio en calcita y, por ende, ser un agente curador altamente eficaz (Hassanin et al., 2024)(Sierra et al., 2017).

Es importante destacar que esta inspección y los resultados presentados en la Tabla 7 hacen referencia únicamente a la zona superficial de la grieta, sin considerar de ninguna manera

² Se tiene estos resultados con el uso de fibras de lino más bacillus subtilis, lino más bacteria cohnii y lino más bacteria sphaericus

³ Se tiene estos resultados con el uso de fibras de coco más bacillus subtilis, coco más bacteria cohnii y coco más bacteria sphaericus

⁴ Se tiene estos resultados con el uso de fibras de yute más bacteria cohnii y yute más bacteria sphaericus

el desarrollo del sellado a lo largo de su profundidad. Únicamente (Xiang et al., 2024) hizo una revisión del desarrollo de la reparación de la fisura en la profundidad de la grieta, en la cual encontró que la utilización de fibras en conjunto con comunidades bacterianas incrementa la capacidad de sellado en la zona profunda de la grieta.

Se debe tener en cuenta también que en la literatura revisada se verifica que mientras más pequeña es la grieta en estado inicial es más factible su completo sellado, por lo que las fibras que permitan mayor puenteo tendrán mayor índice de reparación de fisuras. A más de esto, al ser una abertura pequeña se evita el daño rápido prematuramente del hormigón ya que reduce la posibilidad de ingreso de sustancias agresivas (Zhang et al., 2024).

Uso de fibras en el Ecuador

En el Ecuador la investigación sobre el uso de fibras para el desarrollo de hormigones autorreparables ha sido escasa, ya que casi toda la información existente se centra únicamente en el uso de fibras de acero como componente principal adicional al hormigón, sin necesariamente buscar la fabricación de hormigones autorreparables.

Debido a la biodiversidad de nuestro país existe gran disponibilidad de materia prima para la obtención de fibras de origen vegetal, la cual generalmente es desechada tras la recolección de alimentos de los que esta se desprende. Considerando esto, varios autores han centrado sus trabajos de tesis en la investigación de como estas fibras vegetales afectan a las propiedades mecánicas del hormigón, propiedades que a su vez están relacionadas con la durabilidad de este material. Estos documentos no forman parte de las tablas comparativas presentadas anteriormente ya que no han sido publicados en revistas de alto impacto, sin embargo, es importante mencionarlos para tener un mejor contexto del desarrollo de las fibras en los hormigones autorreparables en el Ecuador.

Lluay (2024) utilizó para su análisis fibras de cabuya, las que posterior a un tratamiento con hidróxido de sodio se añadieron a mezclas de hormigón con la finalidad de descubrir si esta fibra aportaría resistencia a las propiedades de compresión y flexión. Tras los ensayos realizados encontró que la resistencia a la compresión se mantenía similar a las muestras sin fibras, mientras que la flexión aumentó un 35% con el uso de fibras.

Rojas (2015) por otra parte se interesó por el uso de fibras de coco debido a la producción existente de esta planta en la costa ecuatoriana. Al comparar las propiedades de muestras con y sin fibras se percató que la adición de estas al hormigón disminuía su resistencia a compresión.

Al utilizar las fibras para la fabricación de hormigones autorreparables y verificar sus resultados en campo, Sierra et al. (2017) constató que la abacá tiene potencial autorreparador e incrementa la resistencia del hormigón a la compresión y flexión, obteniendo comportamientos similares tanto en laboratorio como en campo.

Causa interés el hecho de que todas estas fibras orgánicas tengan beneficios al ser usadas en mezclas de hormigón no solo debido a su costo económico en comparación con fibras

sintéticas sino también por la abundancia de estos materiales de los que se dispone en el medio. A más de esto, debido a que en las zonas rurales se tiende a realizar quema agrícola de los “desperdicios”, podría ser una buena opción el uso de fibras agrícolas para el desarrollo del hormigón autorreparable.

Como potenciales alternativas para el uso y estudio de hormigones autorreparables en el Ecuador se pueden utilizar las fibras de coco, cabuya, abacá, cáñamo y yute debido a su potencial reparador mostrado en la revisión realizada.

En la Tabla 8 se hace referencia a las fibras utilizadas en las tesis investigadas que han sido desarrolladas sobre hormigones con el uso de fibras en el Ecuador. Estas tesis en su mayoría hacen un análisis de las propiedades mecánicas del hormigón, sin embargo, se relacionarán estos resultados al potencial de hormigones autorreparables para futuras investigaciones.

Tabla 8 Producción científica de fibras orgánicas

Fibra	Producción Científica	Potencial	Análisis
Abacá	E	+	Autorreparación, flexión y tracción
Coco	M	-	Compresión
Palma africana	E	+	Compresión
Cabuya	E	+	Compresión y flexión
Bambú	E	+	Compresión
Pambil	E	/	Compresión y flexión
Yute	E	+	Compresión
Caña de azúcar	M	+	Compresión

Nota: E representa escasa investigación sobre el tema, M representa un nivel medio de investigación y A representa un nivel alto de investigación. + representa potencial positivo para investigar, - representa potencial negativo para investigar y / representa que los resultados no son decisivos.

En el análisis de la Tabla 8 se puede ver que en el Ecuador la investigación sobre el hormigón con el uso de fibras es escasa y que sobre los hormigones autorreparables es casi nula, por lo que existe la necesidad de ampliar el enfoque hacia distintas alternativas de materiales que permitan seguir las tendencias mundiales del desarrollo de nuevas tecnologías en el campo de la construcción.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- En conclusión, este artículo de revisión ha logrado ofrecer un panorama integral sobre las múltiples técnicas de diseño de hormigones autorreparables, incorporando tanto fibras como combinaciones de fibras con aditivos adicionales. A través de tablas comparativas que resumen los resultados obtenidos, se han destacado las características más relevantes que deben considerarse al momento de diseñar mezclas. Esta información no solo contribuye al avance de la investigación en este ámbito, sino que también sirve como guía práctica para ingenieros y profesionales en la construcción, facilitando la elección de las estrategias más efectivas para optimizar la durabilidad y sostenibilidad de las estructuras de hormigón.
- De acuerdo a los criterios establecidos por los autores analizados, tanto las fibras orgánicas como inorgánicas aportan al índice de reparación del hormigón, cada una con sus características afecta a distintas propiedades, por lo que previo a la utilización de fibras en dosificaciones se debe considerar los factores críticos a los que se verán sometidos los elementos estructurales. Se puede destacar que la fibra Ultra Fiber 500 a pesar de ser de uso comercial no presenta mejoras en las propiedades mecánicas del hormigón debido a que, al ser una microfibras, únicamente previene el agrietamiento en el fraguado, sin embargo, al adicionarla con bacterias este comportamiento cambia mejorando su resistencia a la compresión y permitiendo un sellado total de la fisura superficial. Las fibras de acero por otra parte en conjunto con bacterias disminuyen su resistencia a la flexión y tracción, lo que resulta intrigante ya que el acero es el material más utilizado con el hormigón para compensar estas propiedades.
- La investigación realizada sobre el uso de diferentes fibras y aditivos en la modificación de las propiedades del hormigón ha revelado conclusiones significativas que podrían transformar las prácticas de ingeniería civil relacionadas con la durabilidad y resistencia de las estructuras de hormigón. Las fibras de celulosa, al actuar como reservas de agua, promueven un curado más eficiente del hormigón, lo que es vital para el desarrollo de su resistencia interna.
- Por otro lado, las fibras de caucho granulado, aunque útiles para sellar grietas, no aportan a la resistencia a compresión, lo que resalta la importancia de elegir adecuadamente los materiales según el objetivo deseado.
- El análisis también indicó que la longitud de las fibras es un factor crítico; una mayor longitud proporciona un soporte superior tanto a la compresión como a la tracción, siendo este un aspecto clave a considerar en el diseño de mezclas que buscan mejorar la resistencia mecánica.
- Sin embargo, la inclusión de fibras agrícolas y cenizas volantes, aunque puede tener beneficios en ciertas propiedades mecánicas del hormigón, puede afectar negativamente la fluidez y trabajabilidad del hormigón, lo que destaca la necesidad de un equilibrio en la formulación de mezclas.

- El uso de nanopartículas ha demostrado ser eficaz en la reducción de la contracción por secado, contribuyendo así a mantener la estabilidad del hormigón
- De la revisión de los artículos se desprende un análisis en función de las características de durabilidad y sellado de las muestras, en el cual se determinó el gran potencial que tiene el uso de fibras para el mejoramiento de la capacidad autorreparativa del hormigón.
- Posterior a la evaluación de los artículos de revisión se puede concluir que los ensayos más importantes a realizarse para el análisis del uso de fibras en la capacidad de autorreparación del hormigón son las inspecciones visuales y propiedades mecánicas de compresión, flexión y tracción. Estas permitirán tener una idea clara de la capacidad de autorreparación de las muestras y su durabilidad en condiciones óptimas.
- La investigación sobre el uso de fibras agrícolas en el Ecuador revela una oportunidad significativa para mitigar los problemas de residuos y contaminación generados por su desecho. Los resultados obtenidos demuestran que las fibras de coco, abacá, cabuya, cáñamo y yute no solo son recursos abundantes en el país, sino que también presentan propiedades mecánicas prometedoras que pueden ser aprovechadas en diversas aplicaciones de ingeniería civil. Al integrarlas en formulaciones de materiales, especialmente en compuestos destinados a la construcción, se puede mejorar notablemente la resistencia a la compresión y el sellado superficial de fisuras, contribuyendo así a la sostenibilidad de las edificaciones y la gestión de residuos. Esta propuesta no solo fomenta el uso responsable de recursos locales, sino que también abre un campo de investigación y desarrollo que puede ser clave para el avance de prácticas más ecológicas y eficientes en el ámbito de la ingeniería civil en el Ecuador.

Recomendaciones

- Incentivar y promover el uso de fibras renovables y reciclables con la finalidad de contribuir a la protección del medio ambiente y al uso responsable de los recursos en el campo de la construcción
- Clasificar el estudio de las fibras orgánicas e inorgánicas que tienen como finalidad la autorreparación del hormigón enmarcándolas en función de su aporte a cada una de las propiedades en estudio, de esta manera sería más fácil proponer su uso para cada uno de los elementos estructurales.
- Crear un método estandarizado para el análisis de la capacidad de autorreparación del hormigón, en vista de que actualmente se determinan estas características sobre la base del criterio de cada autor.
- Implementar un enfoque sistemático para el reciclaje de fibras agrícolas provenientes de desechos, estableciendo colaboración con agricultores y centros de recolección de desechos agrícolas para asegurar un suministro constante de materiales, capacitando y concienciando sobre el beneficio que su uso puede traer a la resistencia y durabilidad del hormigón.
- Realizar una investigación exhaustiva sobre el desarrollo y la aplicación de hormigones autorreparables que incorporen fibras, empleando materiales locales

ecuatorianos. Esta investigación debería enfocarse en evaluar la viabilidad, el rendimiento y la sostenibilidad de estas mezclas innovadoras, considerando las características específicas de los recursos disponibles en Ecuador.

BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo, A., & Esponisa, B. (2017). *ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO CON ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE DE TERMOPAIPA* (Vol. 14). Universidad Católica de Colombia.
- Ahmad, J., Mohammed Jebur, Y., Tayyab Naqash, M., Sheraz, M., Hakamy, A., & Farouk Deifalla, A. (2024). Improvement in the strength of concrete reinforced with agriculture fibers: Assessment on mechanical properties and microstructure analysis. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 19. <https://doi.org/10.1177/15589250241226480>
- Amran, M., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Vatin, N. I., Saifulnaz, R., Rashid, M., ... Ozbakkaloglu, T. (2022). *Self-Healing Concrete as a Prospective Construction Material : A Review*. 1–46.
- Barrera, G., Moran, E. V., Solorzano, W. M., & Perdomo, M. E. (2023). Comparative Study of Coconut and Corn Fibers as Aggregate in Concrete. *Proceedings of 2023 IEEE Central America and Panama Student Conference, CONESCAPAN 2023*, 70–75. <https://doi.org/10.1109/CONESCAPAN60431.2023.10328414>
- Chen, Z., Wang, X., Ding, L., Niu, F., Jiang, K., Wang, H., & Wu, Z. (2024). Effects of basalt fiber reinforced polymer minibars on the flexural behavior of pre-cracked UHPC after chloride induced corrosion. *Journal of Building Engineering*, 82(December 2023), 108382. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.108382>
- Cuenca, E., & Ferrara, L. (2017). Self-healing capacity of fiber reinforced cementitious composites. State of the art and perspectives. *Journal of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-0939-5>
- Cuenca, Estefanía, Criado, M., & Giménez, M. (2022). *Effects of Alumina Nanofibers and Cellulose Nanocrystals on Durability and Self-Healing Capacity of Ultrahigh-Performance Fiber-Reinforced Concretes*. (January). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0004375](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0004375)
- Cuenca, Estefanía, & Ferrara, L. (2020). Fracture toughness parameters to assess crack healing capacity of fiber reinforced concrete under repeated cracking-healing cycles. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 106(December 2019), 102468. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2019.102468>
- Danish, A., Mosaberpanah, M. A., & Salim, M. U. (2020). Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: a critical review on efficiency of implemented treatments. *Journal of Materials Research and Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.04.053>
- Deeba, S., & Ammasi, A. K. (2024). State-of-the-art review on self-healing in mortar, concrete, and composites. *Case Studies in Construction Materials*, 20(April), e03298. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03298>
- Feng, J., Su, Y., & Qian, C. (2019). Coupled effect of PP fiber , PVA fiber and bacteria on self-healing efficiency of early-age cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, 228, 116810. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116810>
- Garg, M., & Azarsa, P. (2021). *Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites*. 1–20. <https://doi.org/10.3390/jcs5050122>
- Hajmohammadian, M., Razavi, S., Valerievich, K. A., Faridmehr, I., & Hassanipour, A. (2022). Mechanical Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Containing Organic

- Waste Ash. *Engineered Science*, 20, 275–283. <https://doi.org/10.30919/es8d747>
- Hassanin, A., El-Nemr, A., Shaaban, H. F., Saidani, M., & Shaaban, I. G. (2024). Coupling Behavior of Autogenous and Autonomous Self-Healing Techniques for Durable Concrete. *International Journal of Civil Engineering*, 22(6), 925–948. <https://doi.org/10.1007/s40999-023-00931-4>
- Homma, D., Mihashi, H., & Nishiwaki, T. (2014). *Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites*. (July 2009). <https://doi.org/10.3151/jact.7.217>
- Houshmand, M., Ali, S., Kamireddi, D., Sadighi, A., Sales, C. M., Schauer, C. L., & Najafi, A. (2024). Carbonate biomineralization potential of endospore-laden polymeric fibers (BioFibers) for bio-self-healing applications. *Developments in the Built Environment*, 17(October 2023), 100351. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100351>
- Huang, X., Kaewunruen, S., & Su, Q. (2020). The Self-Sealing Capacity of Environmentally Friendly, Highly Damped, Fibre-Reinforced Concrete. *Materials*, 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma13020298>
- Igbokwe, E., Ibekwe, S., Mensah, P., Agu, O., & Li, G. (2024). Self-healing of macroscopic cracks in concrete by cellulose fiber carried microbes. *Journal of Building Engineering*, 90(April), 109383. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109383>
- Jiang, L., Xia, H., Hu, S., Zhao, X., Wang, W., Zhang, Y., & Li, Z. (2024). Crack-healing ability of concrete enhanced by aerobic-anaerobic bacteria and fibers. *Cement and Concrete Research*, 183(June), 107585. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2024.107585>
- Kumar, P., Periyasamy, M., Pathikonda, P., Kiran, U., Pavan, S. P., Zahid, M., & Avula, D. (2024). Enhancing the strength properties of concrete using coconut fiber and coconut fiber ash. *AIP Conference Proceedings*, 3037(1). <https://doi.org/10.1063/5.0196073>
- Lluay, N. (2024). *Análisis del hormigón reforzado con fibras de cabuya al 0.5%, 0.75% y 1% con tratamiento químico*. Escuela Politécnica Nacional.
- Ma, W., Chen, T., Deng, P., & Guo, S. (2024). Enhancing the self-healing performance of engineered cementitious composites in harsh environment through cementitious matrix optimization and crack width controlling. *Journal of Building Engineering*, 94(May), 109732. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109732>
- Ma, Y., Yu, X., Zhao, F., Liu, J., Zhu, P., Zhang, P., ... Wu, L. (2022). *Research Progress in Environmental Response of Fiber Concrete and Its Functional Mechanisms*. 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/3059507>
- Meraz, M. M., Mim, N. J., Mehedi, M. T., Bhattacharya, B., Aftab, M. R., Billah, M. M., & Meraz, M. M. (2023). Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures. *Alexandria Engineering Journal*, 73, 665–694. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.05.008>
- Mihashi, H., & Kohno, Y. (1999). *Toughening mechanism of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composites*. (1985).
- Moawad, D. R. M., & Moussa, R. R. (2023). The effect of using data palm waste fibers in plain concrete mixture by comparing three pre-treatment techniques. *Scientific Reports*, 13(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37860-0>
- Munday, J., C., S., & Dhir, R. (1974). Comparative study of autogenous healing of different concretes. *Aust Conf on Eng Mater*, 1st.
- Neeraja, P., & Prasad, B. S. R. K. (2023). Experimental Investigation on Self Healing of Fibre Reinforced Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1193(1).

- <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1193/1/012010>
- Neves, A., Almeida, J. A. P. P., Miranda, T., Cunha, V. M. C. F., & Pereira, E. (2024). *Self-healing assessment and variability in plain and recycled tyre fiber reinforced concrete based on tensile splitting test*. 84(January). <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108567>
- Nguyen, M., Fernandez, C. A., Haider, M., Chu, K., Jian, G., Nassiri, S., ... Glezakou, V. (2022). *Toward Self-Healing Concrete Infrastructure : Review of Experiments and Simulations across Scales*. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.2c00709>
- Ogunbode, E. B., Nyakuma, B. B., Jimoh, R. A., Lawal, T. A., & Nmadu, H. G. (2021). *Mechanical and microstructure properties of cassava peel ash-based kenaf bio-fibrous concrete composites*. (May). <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01588-6>
- Posada, B. (1994). La degradación del concreto armado. *Revista Universidad EAFIT*, 30(93), 83–98. Recuperado de <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/download/1417/1289/4688>
- Rauf, M., Khaliq, W., Arsalan, R., & Ahmed, I. (2020). Comparative performance of different bacteria immobilized in natural fibers for self-healing in concrete. *Construction and Building Materials*, 258, 119578. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119578>
- Rojas, A. (2015). Adición de la fibra de coco en el hormigón y su incidencia en la resistencia a compresión. Recuperado de <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/17066>
- Rostman, S. (1992). *Tecnología moderna de durabilidad*. Cuadernos Intemac.
- Salam, A., Abro, F., Ali, M., Ali, T., & Bheel, N. (2024). Effect of silica fume on fracture analysis , durability performance and embodied carbon of fiber-reinforced self-healed concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 130(February), 104333. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2024.104333>
- Siad, H., Lachemi, M., Sahmaran, M., & Hossain, A. (2017). Multi-functional cementitious composites with sensing and healing capabilities. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 4(1), 1–6. <https://doi.org/10.14455/ISEC.res.2017.101>
- Sierra, G., Mera, W., & Jonkers, H. M. (2017). Hormigón autorreparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: Principios y aplicaciones en Ecuador. *Alternativas*, 17(3), 207–214. <https://doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.229>
- Singh, H., & Gupta, R. (2019). Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, e00324. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00324>
- Singh, H., & Gupta, R. (2020). Cellulose fiber as bacteria-carrier in mortar : Self-healing quantification using UPV. *Journal of Building Engineering*, 28(November 2019), 101090. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101090>
- Su, Y., Qian, C., Rui, Y., & Feng, J. (2020). Exploring the coupled mechanism of fibers and bacteria on self-healing concrete from bacterial extracellular polymeric substances (EPS). *Cement and Concrete Composites*, 116(December 2020), 103896. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103896>
- Vijay, K., & Murmu, M. (2019). Self - repairing of concrete cracks by using bacteria and basalt fiber. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1–10. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1404-5>
- Weinmeister, P. (2019). *Practical salesforce development without code: Building declarative solutions on the salesforce platform* (1st.). Apress.
- Wu, H., Shen, A., Cheng, Q., Cai, Y., Ren, G., Pan, H., & Deng, S. (2023). A review of recent developments in application of plant fibers as reinforcements in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 419(6), 138265. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138265>

- Xiang, J., Qu, L., Fei, X., Qiu, J., & Kong, X. (2024). Depth-dependent self-healing capacity and mechanism of cracked fiber-reinforced concrete by bacterial community. *Journal of Building Engineering*, 84(January), 108485. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108485>
- Yao, C., Shen, A., Guo, Y., Lyu, Z., He, Z., & Wu, H. (2022). A review on autogenous self-healing behavior of ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC). *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(3), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00462-0>
- Zhang, L., Zheng, M., Zhao, D., & Feng, Y. (2024). A review of novel self-healing concrete technologies. *Journal of Building Engineering*, 89(24), 109331. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109331>