

AVANCES EN LA INYECCIÓN A PRESIÓN PARA MICROFISURAS EN ELEMENTOS
DE CONCRETO PARA INFRAESTRUCTURA VIAL



OSCAR ALBERTO GÓMEZ MICAN



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

AVANCES EN LA INYECCIÓN A PRESIÓN PARA MICROFISURAS EN ELEMENTOS
DE CONCRETO PARA INFRAESTRUCTURA VIAL

OSCAR ALBERTO GOMEZ MICAN

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Mg. JUAN MANUEL SALGADO DÍAZ

Magíster en Ingeniería civil

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2024

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O.P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Rodrigo GARCÍA JARA, O.P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria General Seccional Villavicencio

Mg. LUIS FERNANDO DÍAZ CRUZ

Decano de la Facultad de Ingeniería Civil

Dedicatoria

A mí familia, en especial a mi madre y padre, por su apoyo incondicional y guía en la realización de esta monografía.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron en la realización de esta monografía.

A la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, por el conocimiento adquirido, para el desarrollo del proyecto.

Agradezco al Ing. Juan Manuel Salgado por brindarme la dirección valiosa y colaboración en la investigación.

A mí familia, a mi madre y padre por el apoyo emocional.

Contenido

Resumen	14
Abstract.....	15
Glosario.....	16
Introducción.....	17
1. Formulación del problema.....	18
1.1. Pregunta de investigación.....	19
2. Objetivos	20
2.1. Objetivo general	20
2.2. Objetivos específicos.....	20
3. Justificación.....	21
4. Estado del arte	22
4.1. Gestión de dos problemas simultáneos en la reparación del hormigón: la curación de microfisuras y el control de patógenos	23
4.2. Evaluación de Microfisuras en UHPC a través de Aprendizaje Automático.....	23
4.3. Incorporación de Microcápsulas Autorreparables en Materiales de Cemento.....	24
4.4. Propiedades autocurativas autógenas del macadam estabilizado con cemento después del microfisurado	24
4.5. La aplicación de polímero superabsorbente recubierto en cemento de pozo para taponar la microfisura	25
4.6. Comportamiento de autocuración de múltiples microfisuras de compuestos cementosos de endurecimiento por deformación (SHCC)	25
4.7. Propiedades de preparación e ingeniería de materiales de lechada epoxi de baja viscosidad modificados con silicona para la reparación de microfisuras	26

4.8.	Capacidad de autocuración de compuestos cementosos reforzados con fibra de endurecimiento ultrarrápido bajo tensión	26
4.9.	Desarrollo y caracterización de microcápsulas compuestas SA/MPF-E44 para la autoreparación del hormigón	26
4.10.	Inyección de sílice a baja presión para la reducción de la porosidad en materiales cementosos	27
4.11.	Investigación experimental de la tenacidad a la fractura en modo I de hormigón fisurado real reparado por epoxi	27
4.12.	Estudio experimental de reparación epoxi de grietas en hormigón.....	28
5.	Desarrollo de la metodología empleada	29
5.1.	Inyecciones De Grandes Grietas Con Resina Epoxi	29
5.1.1	Fundamentos	29
5.1.2	Funcionamiento.....	29
5.1.3	Ventajas.....	29
5.1.4	Análisis de los Materiales Empleados	30
5.1.5	Procedimientos.....	30
5.1.6	Equipos	31
5.1.7	Limitaciones Actuales.....	31
5.1.8	Investigación Futura.....	31
5.2.	Tecnologías novedosas para rehabilitar, restaurar o reestructurar la superestructura....	32
5.2.1	Fundamentos	32
5.2.2	Funcionamiento.....	32
5.2.3	Ventajas.....	32
5.2.4	Análisis de los Materiales Empleados	33
5.2.5	Procedimientos.....	33

5.2.6	Equipos Necesarios	34
5.2.7	Limitaciones Actuales.....	34
5.2.8	Futuras Áreas de Investigación.....	34
5.3.	Guía de especificación para el tratamiento de fisuras en el concreto.....	35
5.3.1	Fundamentos	35
5.3.2	Funcionamiento.....	35
5.3.3	Ventajas.....	35
5.3.4	Análisis de los Materiales Empleados	36
5.3.5	Procedimientos.....	36
5.3.6	Equipos Necesarios.....	36
5.3.7	Limitaciones Actuales.....	37
5.3.8	Futuras Áreas de Investigación.....	37
5.4.	Sistemas de reparación estructural de pavimento rígido con inyecciones de resinas epóxicas.....	37
5.4.1	Fundamentos	37
5.4.2	Funcionamiento.....	38
5.4.3	Ventajas.....	38
5.4.4	Análisis de los Materiales Empleados	38
5.4.5	Procedimientos.....	38
5.4.6	Equipos Necesarios.....	39
5.4.7	Limitaciones Actuales.....	39
5.4.8	Futuras Áreas de Investigación.....	39
5.5.	Capacidad de autocuración bajo tensión de materiales compuestos cementicios reforzados con fibras de endurecimiento ultrarrápido	40
5.5.1	Fundamentos	40

5.5.2	Funcionamiento.....	40
5.5.3	Ventajas.....	40
5.5.4	Análisis de los Materiales Empleados	41
5.5.5	Procedimientos.....	41
5.5.6	Equipos Necesarios	41
5.5.7	Limitaciones Actuales.....	41
5.5.8	Futuras Áreas de Investigación	42
5.6.	Propiedades autógenas de autocuración del macadán estabilizado con cemento tras microfisuración	42
5.6.1	Fundamentos	42
5.6.2	Funcionamiento.....	42
5.6.3	Ventajas.....	43
5.6.4	Análisis de los Materiales Empleados	43
5.6.5	Procedimientos.....	43
5.6.6	Equipos Necesarios	44
5.6.7	Limitaciones Actuales.....	44
5.6.8	Futuras Áreas de Investigación	44
5.7.	Propiedades autocurativas de microcápsulas compuestas a base de alginato sódico/resina de melamina-fenol-formaldehído.....	45
5.7.1	Fundamentos	45
5.7.2	Funcionamiento.....	45
5.7.3	Ventajas.....	45
5.7.4	Análisis de los Materiales Empleados	46
5.7.5	Procedimientos.....	46
5.7.6	Equipos Necesarios	46

5.7.7	Limitaciones Actuales.....	47
5.7.8	Futuras Áreas de Investigación.....	47
5.8.	Investigación experimental de la tenacidad a la fractura en modo I de hormigón agrietado real reparado con epoxi	47
5.8.1	Fundamentos	47
5.8.2	Funcionamiento.....	47
5.8.3	Ventajas.....	48
5.8.4	Análisis de los Materiales Empleados	48
5.8.5	Procedimientos.....	48
5.8.6	Equipos Necesarios.....	49
5.8.7	Limitaciones Actuales.....	49
5.8.8	Futuras Áreas de Investigación.....	49
5.9.	La aplicación de polímero superabsorbente recubierto en el cemento de pozo para taponar la microfisura	50
5.9.1	Fundamentos	50
5.9.2	Funcionamiento.....	50
5.9.3	Ventajas.....	50
5.9.4	Análisis de los Materiales Empleados	51
5.9.5	Procedimientos.....	51
5.9.6	Equipos Necesarios.....	51
5.9.7	Limitaciones Actuales.....	52
5.9.8	Futuras Áreas de Investigación.....	52
5.10.	Preparación y propiedades técnicas de materiales de inyección epóxicos de baja viscosidad modificados con silicona para la reparación de microfisuras	52
5.10.1	Fundamentos	52

5.10.2	Funcionamiento.....	53
5.10.3	Ventajas.....	53
5.10.4	Análisis de los Materiales Empleados	53
5.10.5	Procedimientos.....	54
5.10.6	Equipos Necesarios	54
5.10.7	Limitaciones Actuales.....	54
5.10.8	Futuras Áreas de Investigación	54
5.11.	Visualización y cuantificación de los comportamientos de autocuración de microfisuras en materiales a base de cemento que incorporan microcápsulas de autocuración marcadas con fluorescencia	55
5.11.1	Fundamentos	55
5.11.2	Funcionamiento.....	55
5.11.3	Ventajas.....	55
5.11.4	Análisis de los Materiales Empleados	56
5.11.5	Procedimientos.....	56
5.11.6	Equipos Necesarios	56
5.11.7	Limitaciones Actuales.....	57
5.11.8	Futuras Áreas de Investigación.....	57
5.12.	Efectos de las microfisuras por contracción autógena en el UHPC: Perspectivas de un enfoque de cuantificación de fisuras basado en el aprendizaje automático	57
5.12.1	Fundamentos	57
5.12.2	Funcionamiento.....	58
5.12.3	Ventajas.....	58
5.12.4	Análisis de los Materiales Empleados	58
5.12.5	Procedimientos.....	59

5.12.6	Equipos Necesarios	59
5.12.7	Limitaciones Actuales	59
5.12.8	Futuras Áreas de Investigación	60
5.13.	Comportamiento autorregenerativo de microfisuras múltiples de compuestos cementicios de endurecimiento por deformación (SHCC) Fundamentos	60
5.13.1	Funcionamiento	60
5.13.2	Ventajas	61
5.13.3	Análisis de los Materiales Empleados	61
5.13.4	Procedimientos	61
5.13.5	Equipos Necesarios	62
5.13.6	Limitaciones Actuales	62
5.13.7	Futuras Áreas de Investigación	62
5.14.	Inyección de sílice a baja presión para reducir la porosidad en materiales cementosos	63
5.14.1	Fundamentos	63
5.14.2	Funcionamiento	63
5.14.3	Ventajas	63
5.14.4	Análisis de los Materiales Empleados	64
5.14.5	Procedimientos	64
5.14.6	Equipos Necesarios	64
5.14.7	Limitaciones Actuales	65
5.14.8	Futuras Áreas de Investigación	65
5.15.	Gestión de dos problemas simultáneos en la reparación del hormigón: La curación de microfisuras y el control de patógenos	65
5.15.1	Fundamentos	65

5.15.2	Funcionamiento.....	66
5.15.3	Ventajas.....	66
5.15.4	Análisis de los Materiales Empleados	66
5.15.5	Procedimientos.....	67
5.15.6	Equipos Necesarios	67
5.15.7	Limitaciones Actuales.....	67
5.15.8	Futuras Áreas de Investigación	68
6.	Conclusiones	69
7.	Recomendaciones	70
8.	Bibliografía.....	71

Resumen

El trabajo aborda los avances más recientes en la aplicación de la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas para la reparación de microfisuras en elementos de concretos empleados en Infraestructura Vial. Esta técnica ha ganado atención debido a su capacidad para restaurar la integridad estructural del concreto y prolongar la vida útil de las infraestructuras. El documento profundiza en los principios fundamentales de esta técnica, destacando la importancia de la correcta selección de materiales, la preparación adecuada de las superficies, y la optimización de las condiciones de inyección. Además, se presentan estudios de caso que ilustran la efectividad de la técnica en diversos contextos, así como sus limitaciones actuales, incluyendo la necesidad de un control preciso durante la aplicación y la evaluación de su durabilidad a largo plazo. Finalmente, se discuten posibles áreas de investigación futura, que incluyen el desarrollo de nuevas formulaciones de resinas y la automatización del proceso para mejorar la consistencia y eficiencia de las reparaciones.

Palabras claves: *Inyección a presión, Resinas epóxicas, Microfisuras en concreto, Reparación de infraestructuras, Durabilidad del concreto*

Abstract

This study examines the latest advances in the application of pressure injection techniques using epoxy resins for the repair of microcracks in concrete elements used in road infrastructure. This technique has attracted significant attention due to its ability to restore the structural integrity of concrete and extend the lifespan of infrastructure. The paper delves into the fundamental principles of this technique, emphasizing the importance of proper material selection, surface preparation, and the optimization of injection conditions. Additionally, case studies are presented to demonstrate the effectiveness of the technique in various contexts, along with its current limitations, including the need for precise control during application and the assessment of its long-term durability. Finally, potential areas for future research are discussed, including the development of new resin formulations and the automation of the process to improve the consistency and efficiency of repairs.

Keywords: *Pressure injection, Epoxy resins, Concrete microcracks, Infrastructure Repair, Concrete durability*

Glosario

Autocuración: Propiedad de ciertos materiales, particularmente los compuestos cementicios, para cerrar microfisuras sin intervención externa. Este proceso puede ser natural o inducido mediante la incorporación de aditivos o técnicas que promuevan la regeneración del material dañado.

Infraestructura vial: Conjunto de sistemas de transporte, principalmente carreteras y puentes, que son fundamentales para la movilidad y el desarrollo económico de una región. La durabilidad de esta infraestructura es crítica, ya que cualquier deterioro puede tener efectos negativos significativos en la economía y la seguridad.

Inyección a presión: Técnica de reparación de fisuras que implica la inyección controlada de resinas epóxicas líquidas en las microfisuras del concreto bajo presión. Este proceso asegura que la resina penetre profundamente en las fisuras, rellenándolas y sellándolas eficazmente.

Microfisuras: Fisuras extremadamente pequeñas que se forman en los elementos de concreto debido a factores como la carga repetitiva, variaciones térmicas, humedad, y ciclos de congelación-descongelación. Estas fisuras pueden servir como puntos de inicio para grietas más grandes que comprometen la integridad estructural del concreto.

Resinas Epóxicas: Polímeros termoestables que, al mezclarse con un agente endurecedor, forman un material rígido con altas propiedades adhesivas y de cohesión, utilizado principalmente para sellar fisuras y restaurar la continuidad y resistencia en estructuras de concreto.

Introducción

La infraestructura vial es un pilar esencial para el desarrollo económico y social de cualquier región, facilitando la movilidad, el comercio, y el acceso a servicios. Sin embargo, uno de los desafíos más significativos que enfrenta esta infraestructura es la durabilidad de sus elementos, particularmente los de concreto, que están sujetos a condiciones ambientales adversas y cargas constantes. Las microfisuras en el concreto representan un problema recurrente, ya que pueden comprometer la integridad estructural de las infraestructuras y acelerar su deterioro. Estas fisuras, aunque inicialmente pequeñas, pueden actuar como puntos de inicio para grietas más grandes, permitiendo la entrada de agentes agresivos como agua y sales, lo que acelera la corrosión de las armaduras internas y reduce significativamente la vida útil de las estructuras.

En respuesta a este desafío, la inyección a presión de resinas epóxicas ha surgido como una técnica prometedora para la reparación de microfisuras en elementos de concreto. Esta técnica consiste en la inyección de resinas epóxicas líquidas bajo presión dentro de las microfisuras, rellenándolas y sellándolas desde su origen. Las resinas epóxicas son conocidas por sus excepcionales propiedades adhesivas y de cohesión, lo que permite restablecer la continuidad y resistencia del material. A pesar de su efectividad, la técnica enfrenta varios desafíos, como la correcta selección de la resina, la preparación adecuada de la superficie, y el control preciso de la presión de inyección y la expansión térmica de la resina. Además, es crucial evaluar el comportamiento a largo plazo del concreto reparado bajo condiciones de servicio reales para garantizar la durabilidad de la reparación.

Este trabajo tiene como objetivo explorar en profundidad los avances recientes en la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas para la reparación de microfisuras en infraestructuras viales. Se abordarán los principios fundamentales de la técnica, los materiales utilizados, las metodologías de aplicación, y se presentarán estudios de caso que demuestran su efectividad en la práctica. Asimismo, se discutirán las limitaciones actuales de la técnica y se propondrán áreas de investigación futura para optimizar y expandir su uso en la industria de la construcción.

1. Formulación del problema

La infraestructura vial es fundamental para el desarrollo económico y social de cualquier región. Sin embargo, uno de los desafíos más significativos que enfrenta es la durabilidad de los elementos de concreto, especialmente en condiciones climáticas extremas. Las microfisuras en el concreto son una preocupación constante, ya que pueden comprometer la integridad estructural y reducir la vida útil de las infraestructuras viales (Deng et al., 2022).

Las microfisuras en los elementos de concreto pueden surgir debido a diversos factores, como la carga repetitiva del tráfico, las variaciones térmicas, la humedad y los ciclos de congelación y descongelación (Tlajji et al., 2022). Estas microfisuras, aunque inicialmente pequeñas y aparentemente inofensivas, pueden actuar como puntos de inicio para grietas más grandes y permitir la entrada de agentes agresivos, como agua y sales, que aceleran el deterioro del concreto y la corrosión de las armaduras internas.

La inyección a presión de resinas epóxicas ha emergido como una técnica prometedora para la reparación de estas microfisuras. Esta técnica consiste en la inyección de resinas epóxicas líquidas bajo presión dentro de las microfisuras, logrando así rellenar y sellar estas fisuras desde su origen. Las resinas epóxicas tienen propiedades adhesivas y de cohesión excepcionales, lo que permite restablecer la continuidad y resistencia del material, mejorando significativamente la durabilidad y resistencia del concreto (Zhang et al., 2022).

A pesar de su eficacia, la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas no está exenta de desafíos. La correcta selección de la resina, la preparación adecuada de la superficie, la presión de inyección óptima y el control de la expansión térmica de la resina son algunos de los factores críticos que determinan el éxito de la reparación ((Deng et al., 2022)). Además, es necesario evaluar el comportamiento a largo plazo del concreto reparado bajo condiciones de servicio reales.

Esta monografía tiene como objetivo explorar los avances recientes en la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas para la reparación de microfisuras en elementos de concreto utilizados en infraestructura vial. Se abordarán los principios fundamentales de la técnica, los materiales empleados, las metodologías de aplicación y los estudios de caso que demuestran su efectividad. Asimismo, se discutirán las limitaciones actuales y las áreas de investigación futura para optimizar y ampliar el uso de esta técnica en la industria de la construcción.

1.1. Pregunta de investigación

¿Cómo han contribuido los avances en la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas a la mejora de la durabilidad y resistencia de los elementos de concreto en infraestructuras viales, y cuáles son los desafíos y limitaciones actuales que deben superarse para optimizar su aplicación?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Analizar los procesos de tecnificación de la inyección a presión como método para el tratamiento de microfisuras en dovelas de puentes de concreto.

2.2. Objetivos específicos

- Describir los principios fundamentales de la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas, incluyendo su funcionamiento y ventajas.
 - Analizar los materiales empleados en la técnica, enfatizando las propiedades y beneficios de las resinas epóxicas.
 - Examinar los métodos de implementación de la técnica, incluyendo los procedimientos y los equipos necesarios.
 - Discutir las limitaciones actuales de la técnica y sugerir áreas de investigación futuras para su optimización y expansión en la industria de la construcción.
- .

3. Justificación

La infraestructura vial es un pilar fundamental para el desarrollo económico y social de cualquier región. Sin embargo, uno de los desafíos más significativos que enfrenta es la durabilidad de los elementos de concreto, especialmente en condiciones climáticas extremas. Las microfisuras en el concreto son una preocupación constante, ya que pueden comprometer la integridad estructural y reducir la vida útil de las infraestructuras viales (SIKA Group, 2024).

Las microfisuras en los elementos de concreto pueden surgir debido a diversos factores, como la carga repetitiva del tráfico, las variaciones térmicas, la humedad y los ciclos de congelación y descongelación (SIKA Group, 2024). Estas microfisuras, aunque inicialmente pequeñas y aparentemente inofensivas, pueden actuar como puntos de inicio para grietas más grandes y permitir la entrada de agentes agresivos, como agua y sales, que aceleran el deterioro del concreto y la corrosión de las armaduras internas (SIKA Group, 2024).

La inyección a presión de resinas epóxicas ha emergido como una técnica prometedora para la reparación de estas microfisuras. Esta técnica consiste en la inyección de resinas epóxicas líquidas bajo presión dentro de las microfisuras, logrando así rellenar y sellar estas fisuras desde su origen. Las resinas epóxicas tienen propiedades adhesivas y de cohesión excepcionales, lo que permite restablecer la continuidad y resistencia del material, mejorando significativamente la durabilidad y resistencia del concreto (SIKA Group, 2024).

A pesar de su eficacia, la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas no está exenta de desafíos. La correcta selección de la resina, la preparación adecuada de la superficie, la presión de inyección óptima y el control de la expansión térmica de la resina son algunos de los factores críticos que determinan el éxito de la reparación. Además, es necesario evaluar el comportamiento a largo plazo del concreto reparado bajo condiciones de servicio reales (SIKA Group, 2024).

Esta monografía tiene como objetivo explorar los avances recientes en la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas para la reparación de microfisuras en elementos de concreto utilizados en infraestructura vial. Se abordarán los principios fundamentales de la técnica, los materiales empleados, las metodologías de aplicación y los estudios de caso que demuestran su efectividad. Asimismo, se discutirán las limitaciones actuales y las áreas de investigación futura para optimizar y ampliar el uso de esta técnica en la industria de la construcción.

4. Estado del arte

La técnica de inyección a presión de resinas epóxicas ha emergido como una solución prometedora para la reparación de microfisuras en elementos de concreto, especialmente en infraestructuras viales. Este estado del arte revisa los avances recientes, los materiales empleados, las metodologías de aplicación y los estudios de caso que demuestran su efectividad.

Esta técnica también se basa en la capacidad de estas resinas para penetrar y sellar microfisuras, restaurando la integridad estructural del concreto (Deng et al., 2022). Las resinas epóxicas son conocidas por sus propiedades adhesivas y de cohesión excepcionales, lo que las hace ideales para este tipo de reparaciones (Zhang et al., 2022).

Las resinas epóxicas utilizadas en la inyección a presión deben cumplir con ciertos criterios de viscosidad, tiempo de curado y resistencia mecánica (García, 2019). La correcta selección de la resina es crucial para el éxito de la reparación (Euclid Group Toxement, 2019). Además, se han desarrollado resinas con propiedades mejoradas para adaptarse a diferentes condiciones climáticas y de carga (Calizaya Romero, 2022a).

La preparación adecuada de la superficie y la presión de inyección óptima son factores críticos en la aplicación de esta técnica. La metodología incluye la limpieza de la fisura, la instalación de puertos de inyección y la aplicación de la resina bajo presión controlada (García, 2019).

Además, se han desarrollado equipos especializados para mejorar la precisión y eficiencia del proceso (Griffin et al., 2017).

A pesar de su eficacia, la técnica enfrenta desafíos como la correcta selección de la resina, la preparación de la superficie y el control de la expansión térmica de la resina. Además, es necesario evaluar el comportamiento a largo plazo del concreto reparado bajo condiciones de servicio reales. La variabilidad en las condiciones ambientales y de carga también puede afectar la efectividad de la reparación.

Las áreas de investigación futura incluyen el desarrollo de resinas con propiedades mejoradas, la optimización de las metodologías de aplicación y la evaluación del comportamiento a largo plazo del concreto reparado. También se sugiere investigar el impacto de las condiciones climáticas extremas en la efectividad de la reparación. Además, se están explorando nuevas tecnologías, como el uso de nanomateriales y aditivos, para mejorar las propiedades de las resinas

epóxicas (Gómez et al., 2020). Diversos estudios de caso han demostrado la efectividad de la inyección a presión de resinas epóxicas en la reparación de microfisuras.

4.1. Gestión de dos problemas simultáneos en la reparación del hormigón: la curación de microfisuras y el control de patógenos

En este estudio se menciona que el concreto presenta una resistencia inferior a la tracción y a la flexión en comparación con su resistencia a la compresión. Esta característica hace que, bajo tensiones de tracción, como las causadas por cargas mecánicas, ciclos de congelación-descongelación y expansión térmica, puedan formarse microfisuras en el material.

Un enfoque innovador para abordar este problema es el uso de microorganismos en la precipitación inducida de carbonato de calcio (MICP, por sus siglas en inglés). Las bacterias formadoras de MICP facilitan la precipitación acelerada de CaCO_3 , especialmente en ambientes con altos niveles de pH. Este proceso no solo ayuda en la cicatrización de microfisuras, sino que también contribuye al desarrollo de biominerales derivados de microorganismos dentro de las estructuras de concreto, mejorando su durabilidad y resistencia. (Min et al., 2024).

4.2. Evaluación de Microfisuras en UHPC a través de Aprendizaje Automático.

Zeng et al. (2024) investiga el uso de filamentos de nanocelulosa (NC) como herramienta para mitigar la contracción autógena del concreto de ultra alto desempeño (UHPC) y analiza cuantitativamente las grietas utilizando un programa de cuantificación automática para evaluar su impacto en las propiedades mecánicas. La adición de humo de sílice aumenta el contenido de gel C-S-H en los morteros de cemento, mientras que la nanocelulosa reduce ligeramente la cantidad de productos de hidratación debido a los iones de calcio unidos a hidroxilo. El humo de sílice provoca una disminución del contenido de hidróxido de calcio (CH) debido a su reacción puzolánica; específicamente, el contenido de CH en las muestras con un 20% de humo de sílice es aproximadamente del 7% a los 28 días.

La resistencia a la compresión no es tan sensible a las grietas en comparación con los poros, por lo que la porosidad de 0-50 nm puede describir mejor la correlación negativa entre la hidratación o la resistencia a la compresión y la porosidad al considerar las grietas, con un

coeficiente de correlación de 0,94. Sin embargo, debido a los diferentes modos de agrietamiento, existe una correlación negativa significativa entre la resistencia a la flexión y la densidad de fisuración, con un coeficiente de correlación de 0,98.(Zeng et al., 2024).

4.3. Incorporación de Microcápsulas Autorreparables en Materiales de Cemento

La tecnología de microcápsulas autorreparables marcadas con fluorescencia se ha desarrollado como una solución innovadora para reparar materiales a base de cemento y restaurar su resistencia. Estudios recientes han demostrado que la incorporación de estas microcápsulas en un 3% en peso puede lograr una tasa de recuperación de resistencia del 35,8%, mientras que la adición de un 5% en peso no afecta significativamente la resistencia inicial del material (X. Wang et al., 2022a).

Las microcápsulas marcadas con fluorescencia, cuando se intercalan dentro de la matriz de resina, permiten visualizar la ruta de reparación hasta las grietas internas utilizando microscopía confocal láser (LSCM). Durante un periodo de 12 horas a 21 días, el ancho de la fluorescencia aumenta entre 1 y 3 μm , indicando la progresión del material reparador desde las microcápsulas hacia las grietas. Este proceso de autorreparación continúa hasta que el material del núcleo se agota, estableciendo una conexión entre diferentes microcápsulas (X. Wang et al., 2022a).

Además, las microcápsulas autorreparables marcadas con fluorescencia permiten la visualización específica de la ubicación de las microfisuras y su reparación, así como la caracterización cuantitativa del ancho de las mismas a través de curvas de intensidad de fluorescencia. La reacción del compuesto de reticulación de la resina epoxi facilita la reparación de microfisuras, la solidificación del material para restaurar la resistencia y la cuantificación preliminar de la profundidad de las microfisuras (X. Wang et al., 2022a).

4.4. Propiedades autocurativas autógenas del macadam estabilizado con cemento después del microfisurado

He et al. (2021) desarrollaron un modelo de control para predecir el grado de microfisuración en un material, considerando factores como la carga aplicada, el tiempo de fisuración y las propiedades del material. Este modelo, basado en el método de superficie de

respuesta (RSM), permitió cuantificar la evolución de las microfisuras durante el proceso de cicatrización. Los resultados indicaron que el grado inicial de fisuración tiene una influencia significativa en la capacidad de autocuración del material. Los autores concluyeron que el material estudiado (CSM) posee una notable capacidad de reparación autónoma tras ser preagrietado.

4.5. La aplicación de polímero superabsorbente recubierto en cemento de pozo para taponar la microfisura

Este estudio innovador propone el uso de polímeros superabsorbentes (SAP) recubiertos de yeso-quitosano-yeso para taponar microfisuras en cemento de pozo. Basándonos en la teoría de percolación, se calculó un umbral de dosificación óptimo del 28.40% para lograr un taponamiento efectivo. Se desarrolló un método experimental para generar microfisuras de manera controlada y evaluar el rendimiento del material propuesto. Los resultados obtenidos demostraron la eficacia del SAP recubierto en la reparación de microfisuras cuando se excede el umbral de dosificación calculado. (Liu et al., 2016)

4.6. Comportamiento de autocuración de múltiples microfisuras de compuestos cementosos de endurecimiento por deformación (SHCC)

Zhang et al. (2018) el estudio, se evaluaron la autocuración de compuestos cementosos de endurecimiento por deformación (SHCC) sometidos a cargas de flexión. Muestras preagrietadas fueron expuestas a diversas condiciones ambientales (niebla de agua, ciclos de humedecimiento-secado y solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$) para analizar la evolución de las microfisuras. Mediante técnicas como radiografía de neutrones y mediciones de absorción de agua, se observó que el proceso de autocuración es lento y depende en gran medida del ancho de la grieta. Las grietas más finas (10-20 μm) mostraron una mayor capacidad de cierre. La presencia de solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aceleró el proceso de curación debido a la activación de reacciones puzolánicas. Además, se estableció una correlación lineal entre el grado de cierre de las grietas y la reducción de la absorción de agua, lo que evidencia la eficacia del proceso de autocuración en la recuperación de las propiedades del material.

4.7. Propiedades de preparación e ingeniería de materiales de lechada epoxi de baja viscosidad modificados con silicona para la reparación de microfisuras

Con el objetivo de identificar el material de lechada más efectivo para la reparación de microgrietas, (C. Wang et al., 2021) llevaron a cabo un estudio exhaustivo que incluyó la optimización del proceso de preparación de los materiales de rejunto y la evaluación de una lechada epoxi modificada con DDMS en condiciones simuladas de microgrietas. Los resultados de este estudio permitieron caracterizar las propiedades de trabajabilidad y adaptabilidad ambiental del material propuesto, y en última instancia, recomendar el material de lechada DEP-II para su aplicación en la reparación de este tipo de daños.

4.8. Capacidad de autocuración de compuestos cementosos reforzados con fibra de endurecimiento ultrarrápido bajo tensión

Este estudio investigó la capacidad de autocuración de compuestos cementosos reforzados con fibra de polietileno (PE) de endurecimiento ultrarrápido. Se observó que la longitud de las fibras de PE tuvo un impacto mayor que su fracción de volumen en el rendimiento del material. Los especímenes con un 2% de fibras de 9 mm de longitud mostraron el mejor desempeño de autocuración después de 30 ciclos húmedo-seco. Aunque la resistencia a la tracción aumentó significativamente, la ductilidad se redujo ligeramente. Sin embargo, la capacidad de absorción de energía se recuperó casi por completo y se observó un notable endurecimiento por deformación. La microscopía electrónica reveló la formación de cristales de CaCO_3 en las microfisuras de menor tamaño, lo que indica un mecanismo de autocuración basado en la precipitación de carbonatos (Chun et al., 2023).

4.9. Desarrollo y caracterización de microcápsulas compuestas SA/MPF-E44 para la autoreparación del hormigón

Para abordar las microfisuras en el hormigón, (Jiang et al., 2021) desarrollaron un nuevo material de microcápsula autorreparable. Se prepararon las microcápsulas SA/MPF-E44 (carcasa de resina fenólica de alginato de sodio/melamina con núcleo de resina epoxi) y analizaron sus

propiedades. Las microcápsulas tienen un tamaño de partícula pequeño y una alta tasa de cobertura. Las muestras de mortero de hormigón con un contenido óptimo de microcápsulas (4%) mostraron la mejor resistencia a la compresión y rendimiento de reparación. Las simulaciones mostraron la eficacia de la resina epoxi autorreparable y el agente de curado liberado en las grietas. En general, las microcápsulas SA/MPF ofrecen una solución prometedora para el hormigón autorreparable con ventajas en cuanto a bajo coste, respetuoso con el medio ambiente y buena autorreparación para las microfisuras del hormigón.

4.10. Inyección de sílice a baja presión para la reducción de la porosidad en materiales cementosos

En este estudio se desarrolló un novedoso tratamiento de consolidación para hormigón y cemento basado en la inyección a baja presión de suspensiones de nano-sílice. Los resultados demostraron una reducción significativa en la porosidad (30%) tras 14 días de tratamiento, gracias a la capacidad de la nano-sílice para penetrar profundamente en la estructura porosa y reaccionar con los hidróxidos presentes, formando nuevos compuestos de unión como C-S-H y C-A-S-H. Además, la nano-sílice actúa como un eficiente relleno, mejorando la densidad del material. Esta técnica muestra un gran potencial para la rehabilitación de estructuras de hormigón dañadas. (Maddalena & Hamilton, 2017)

4.11. Investigación experimental de la tenacidad a la fractura en modo I de hormigón fisurado real reparado por epoxi

En este estudio reciente, Kan et al. (2021) investigaron el comportamiento a la fractura de hormigón reparado con morteros epoxi bajo flexión de tres puntos. Mediante ensayos SEN (Single Edge Notched), se evaluó la tenacidad a la fractura y la energía de fractura, empleando los modelos de Jenq y Shah y de Hillerborg, respectivamente. Los resultados mostraron que la incorporación de morteros epoxi, especialmente aquellos con mayor contenido de arena fina, incrementó significativamente tanto la tenacidad como la energía de fractura del hormigón reparado, en comparación con el hormigón sin reparar. Este comportamiento se atribuye a la capacidad de los morteros epoxi de mejorar la cohesión en la zona de la grieta y retardar su propagación.

4.12. Estudio experimental de reparación epoxi de grietas en hormigón

Numerosos estudios han explorado la reparación de grietas en hormigón utilizando sistemas epoxi. Sin embargo, los resultados obtenidos hasta la fecha han sido variables. En este trabajo, (Issa & Debs, 2007) evaluó el efecto de la reparación con epoxi en la resistencia a la compresión de cubos de hormigón agrietados. Los resultados mostraron que la aplicación adecuada de sistemas epoxi puede restaurar significativamente la resistencia perdida debido a la presencia de grietas.

5. Desarrollo de la metodología empleada

5.1. Inyecciones De Grandes Grietas Con Resina Epoxi

5.1.1 Fundamentos

Mohamed (1996) manifiesta que la técnica consiste en inyectar resina epóxica bajo alta presión en grietas en estructuras de concreto o roca. La resina epóxica actúa como un sellador, uniendo los dos lados de la grieta una vez que se endurece. El proceso de inyección requiere un entorno controlado para asegurar que la resina llene adecuadamente la grieta antes de que comience a endurecer.

5.1.2 Funcionamiento

5.1.2.1. Preparación. Se limpia y prepara la grieta para asegurar que la resina fluya libremente. Cualquier obstrucción o escombros debe ser removido para permitir una adhesión óptima.

5.1.2.2. Inyección. La resina se inyecta bajo presión. La presión abre ligeramente la grieta, permitiendo que la resina penetre más profundamente. La resina llena la grieta, desplazando aire o agua y asegurando una unión fuerte.

5.1.2.3. Curado. Una vez que la grieta está llena, se deja que la resina se endurezca. Este proceso puede llevar varias horas dependiendo de las propiedades de la resina y las condiciones ambientales.

5.1.3 Ventajas

5.1.3.1. Durabilidad. Las resinas epóxicas son resistentes a los químicos y a factores ambientales, lo que hace que la reparación sea duradera.

5.1.3.2. Adaptabilidad. La técnica puede adaptarse a diferentes tamaños y formas de grietas, lo que la hace versátil en diversos escenarios de reparación.

5.1.4 *Análisis de los Materiales Empleados*

5.1.4.1. Resinas Epóxicas. Las resinas epóxicas se caracterizan por su alta resistencia adhesiva, resistencia química y propiedades mecánicas. Pueden formularse con diferentes viscosidades para adaptarse a necesidades específicas de inyección, desde fluidos de baja viscosidad que pueden penetrar en grietas finas hasta tipos más viscosos para aberturas más grandes. El principal beneficio de usar resinas epóxicas en técnicas de inyección es su capacidad para crear una unión fuerte y duradera que puede restaurar la integridad estructural original del material dañado. También son resistentes a una amplia gama de factores ambientales, incluyendo la humedad y los cambios de temperatura.

5.1.4.2. Rellenos y Endurecedores. A veces se añaden rellenos a las resinas epóxicas para modificar su viscosidad y propiedades mecánicas. Los endurecedores se usan para iniciar el proceso de curado. Estos aditivos permiten que las propiedades de la resina se ajusten a requisitos específicos, mejorando el rendimiento en diversas condiciones.

5.1.5 *Procedimientos*

5.1.5.1. Preparación del Sitio. Se limpia y prepara el área alrededor de la grieta para asegurar las mejores condiciones posibles para la adhesión de la resina.

5.1.5.2. Configuración de la Inyección. Se instalan puertos de inyección a lo largo de la grieta para permitir la aplicación controlada de la resina.

Aplicación de Presión: La resina se inyecta bajo presión, monitorizando cuidadosamente la presión para asegurarse de que no cause más daños a la estructura.

5.1.6 Equipos

5.1.6.1. Bomba de Inyección. Se utiliza una bomba de alta presión para inyectar la resina en la grieta.

5.1.6.2. Sistemas de Monitoreo. Equipos para monitorizar la presión y los caudales durante el proceso de inyección para asegurar una distribución uniforme de la resina.

5.1.7 Limitaciones Actuales

5.1.7.1. Aplicación en Condiciones Húmedas. Desafíos en la aplicación de la técnica en entornos con agua o sumergidos.

5.1.7.2. Sensibilidad a la Temperatura. Las resinas epóxicas pueden ser sensibles a los cambios de temperatura durante el proceso de curado, lo que puede afectar sus propiedades finales.

5.1.8 Investigación Futura

5.1.8.1. Mejora de Formulaciones. La investigación podría centrarse en desarrollar resinas epóxicas con un mejor rendimiento en condiciones extremas, como aplicaciones bajo el agua o en entornos con temperaturas fluctuantes.

5.1.8.2. Automatización del Proceso. Desarrollo de sistemas automatizados para inyectar y monitorear la aplicación de la resina, mejorando la consistencia y reduciendo el potencial de error humano.

5.2. Tecnologías novedosas para rehabilitar, restaurar o reestructurar la superestructura

5.2.1 Fundamentos

(Valdiviezo, 2004) El autor describe la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas se basa en la aplicación de una resina fluida en grietas y fisuras presentes en estructuras de concreto o mampostería. La resina epóxica, al endurecerse, forma un material rígido que actúa como un adhesivo extremadamente fuerte, restaurando la integridad estructural del material dañado. La inyección se realiza bajo presión, asegurando que la resina penetre completamente las fisuras y grietas, incluso en las más finas y profundas.

5.2.2 Funcionamiento

5.2.2.1. Preparación de la zona afectada. Las grietas deben estar limpias y libres de contaminantes para asegurar una buena adhesión de la resina.

5.2.2.2. Instalación de equipos. Se instalan packers o boquillas en intervalos regulares a lo largo de la grieta, que funcionarán como puntos de inyección.

5.2.2.3. Inyección de la resina. Utilizando una bomba de inyección, la resina epóxica se introduce bajo presión dentro de las grietas hasta que estas quedan completamente llenas.

5.2.2.4. Curado de la resina. Una vez inyectada, la resina tarda un tiempo determinado en endurecerse (curado), dependiendo de su composición y las condiciones ambientales.

5.2.3 Ventajas

5.2.3.1. Restauración estructural efectiva. La resina fortalece la zona afectada, devolviendo o incluso mejorando su capacidad estructural original.

5.2.3.2. Durabilidad. Las propiedades químicas de las resinas epóxicas ofrecen una resistencia superior frente a la humedad, productos químicos y variaciones térmicas.

5.2.3.3. Versatilidad. Puede aplicarse en una amplia gama de situaciones y tipos de estructuras, desde pequeñas grietas residenciales hasta grandes fisuras en infraestructuras críticas.

5.2.3.4. Minimización de la intervención física. El proceso es poco invasivo comparado con métodos de reparación estructural tradicionales, preservando la estética y la integridad del edificio o estructura.

5.2.4 *Análisis de los Materiales Empleados*

5.2.4.1. Resinas epóxicas. Alta adhesividad, excelente resistencia mecánica, y estabilidad química. Se caracterizan por su capacidad de curarse en condiciones variadas y por formar enlaces fuertes con los materiales a los que se adhieren. Al curar, las resinas forman un compuesto extremadamente duro y resistente, proporcionando una solución permanente para reparaciones estructurales. Son resistentes a la corrosión, lo que las hace ideales para usar en ambientes hostiles.

5.2.4.2. Catalizadores y aceleradores. Sustancias que se añaden a la resina para controlar el tiempo de curado y mejorar la manejabilidad de la mezcla. Permiten ajustar el tiempo de curado según las necesidades específicas del proyecto, desde curados rápidos para reparaciones urgentes hasta procesos más lentos para aplicaciones complejas.

5.2.5 *Procedimientos*

5.2.5.1. Evaluación de la estructura. Determinar la extensión del daño y la idoneidad de la técnica de inyección para la reparación.

5.2.5.2. Preparación de la mezcla. Mezclar la resina con el endurecedor y otros aditivos necesarios.

5.2.5.3. Aplicación. Inyectar la resina en las grietas utilizando equipos especializados que controlan la presión y el volumen de inyección.

5.2.5.4. Inspección y acabado. Verificar la correcta aplicación y realizar acabados superficiales si fuera necesario.

5.2.6 Equipos Necesarios

5.2.6.1. Bombas de inyección. Para inyectar la resina a la presión requerida.

5.2.6.2. Equipos de mezcla. Para preparar la resina asegurando la homogeneidad.

5.2.6.3. Instrumentos de medición. Para controlar la presión y el volumen durante la inyección.

5.2.7 Limitaciones Actuales

- Dependencia del clima y temperatura para el curado efectivo.
- Alto costo comparado con otros métodos de reparación no estructurales.

5.2.8 Futuras Áreas de Investigación

- Desarrollo de nuevas formulaciones de resinas que curen más rápido o en condiciones más extremas.
- Automatización del proceso de inyección para reducir costos y mejorar la precisión.

5.3. Guía de especificación para el tratamiento de fisuras en el concreto

5.3.1 Fundamentos

El tratamiento de fisuras en el concreto es un aspecto crítico en la construcción debido a la baja capacidad del hormigón para resistir esfuerzos a tensión o tracción. Las fisuras en el concreto permiten la entrada de sustancias agresivas, afectando la integridad estructural del material, incluyendo el acero de refuerzo. La comprensión de las causas y el desarrollo de las fisuras es esencial para determinar el método adecuado de reparación, ya que estas pueden ser superficiales o indicar problemas estructurales serios (Euclid Group Toxement, 2019).

5.3.2 Funcionamiento

El documento describe varios métodos de reparación, incluyendo la inyección de resinas epóxicas, que busca restaurar la integridad estructural del concreto agrietado, haciéndolo monolítico nuevamente. El proceso incluye la preparación de la superficie, la selección del material de inyección basado en la viscosidad adecuada, la instalación de puertos de entrada, el sellado externo, la inyección bajo presión, y la verificación de la efectividad de la reparación mediante métodos destructivos y no destructivos (Euclid Group Toxement, 2019).

5.3.3 Ventajas

5.3.3.1. Restauración estructural efectiva. La inyección epóxica convierte elementos de concreto fracturados en monolíticos, restableciendo la resistencia estructural y evitando la penetración de humedad.

5.3.3.2. Durabilidad. Los productos como EUCO INYECCIÓN 100 y TOC 8004 INYECCIÓN ofrecen alta resistencia a la humedad y a variaciones en las condiciones ambientales.

5.3.3.3. Versatilidad. La técnica es aplicable tanto a fisuras finas como a grietas de mayor tamaño, en diversas condiciones estructurales (Euclid Group Toxement, 2019).

5.3.4 *Análisis de los Materiales Empleados*

5.3.4.1. Resinas Epóxicas. EUCO INYECCIÓN 100 y TOC 8004 INYECCIÓN son sistemas epóxicos de baja viscosidad recomendados para la inyección en fisuras estructurales. Son especialmente adecuados para grietas en estructuras expuestas a la humedad o generadas por retracciones, asentamientos diferenciales, entre otros (Euclid Group Toxement, 2019).

5.3.5 *Procedimientos*

5.3.5.1. Preparación de la superficie. Limpiar el área de la fisura, asegurar la adherencia del sellador externo, y ranurar la fisura si es necesario.

5.3.5.2. Selección del material. Basado en la viscosidad y el tamaño de la grieta. Se recomienda una resina de baja viscosidad para grietas pequeñas y de mayor viscosidad para grietas más grandes.

5.3.5.3. Inyección. Iniciar en la parte más ancha de la grieta, asegurando que la resina llene completamente la fisura bajo presión controlada.

5.3.5.4. Verificación. Uso de métodos destructivos (corazones de prueba) y no destructivos (ultrasonido, radiografías) para asegurar la efectividad de la inyección.

5.3.6 *Equipos Necesarios*

5.3.6.1. Bombas de inyección. Para la aplicación de la resina epóxica bajo presión.

5.3.6.2. Puertos de entrada y sello externo. Para asegurar la retención de la resina durante la inyección.

5.3.6.3. Instrumentos de medición. Como pacómetros y ultrasonido para evaluar la penetración y efectividad de la inyección.

5.3.7 Limitaciones Actuales

5.3.7.1. Dependencia de la geometría y estado del concreto. La inyección epóxica requiere que la estructura conserve su geometría y que el acero de refuerzo mantenga sus características.

5.3.7.2. Precisión en la preparación. Cualquier error en la preparación de la superficie o en la instalación de los puertos puede comprometer la reparación (Euclid Group Toxement, 2019).

5.3.8 Futuras Áreas de Investigación

- Desarrollo de resinas con mejores propiedades de adherencia y resistencia en condiciones extremas.
- Innovación en métodos de verificación no destructivos para mejorar la precisión en la evaluación post-reparación (Euclid Group Toxement, 2019).

5.4. Sistemas de reparación estructural de pavimento rígido con inyecciones de resinas epóxicas

5.4.1 Fundamentos

El pavimento rígido está compuesto de materiales duraderos con comportamientos predecibles, resistiendo al contacto con sustancias como gasolina o aceites lubricantes. Su diseño tiene en cuenta propiedades de subrasante, condiciones de tráfico y efectos ambientales. La resistencia del pavimento aumenta con la edad, siendo la resistencia máxima a los 28 días. Este tipo de pavimento se utiliza ampliamente en Bolivia, especialmente en la ciudad de Sucre, donde se identificaron fisuras estructurales y de retracción en las losas de la Avenida Juana Azurduy de Padilla (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.2 Funcionamiento

La reparación de fisuras en pavimento rígido con resinas epóxicas se realiza mediante inyección de la resina en las grietas bajo presión o por gravedad, dependiendo del tipo de patología. La resina Sikadur 52 CL se utilizó en el estudio, caracterizándose por su rápida reacción y alta adherencia al concreto, siendo capaz de penetrar en grietas de hasta 5 mm (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.3 Ventajas

5.4.3.1. Restauración estructural efectiva. Las pruebas de resistencia en vigas de hormigón reparadas con resina epóxica demostraron que el material es capaz de devolver la capacidad estructural original, incluso tras la segunda rotura (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.3.2. Alta adherencia al concreto. Se observó que, en la mayoría de los casos, la fisura reparada permaneció intacta, mientras que nuevas fisuras aparecieron adyacentes a la zona reparada (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.4 Análisis de los Materiales Empleados

5.4.4.1 Resinas Epóxicas (Sikadur 52 CL). Aditivo de dos componentes que ofrece una reparación estructural rápida y efectiva para pavimentos rígidos. Presenta una excelente adherencia al concreto y es aplicable en grietas pequeñas (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.5 Procedimientos

5.4.5.1. Evaluación de la estructura. Se realizó un análisis de las fisuras presentes en las losas de pavimento rígido, identificando fisuras transversales y de retracción (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.5.2. Preparación de la mezcla. La mezcla de concreto utilizada para las pruebas se elaboró siguiendo el método de dosificación del Código Boliviano de Hormigón, ajustando la relación agua-cemento según las condiciones de humedad de los agregados (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.5.3. Aplicación de la Resina. La resina Sikadur 52 CL se inyectó en las fisuras de las vigas de hormigón, observándose la reparación de las fisuras sin que se produjeran nuevas fisuras en el área reparada (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.5.4. Inspección y acabados. Se realizaron ensayos de resistencia a la flexión a los 10 y 28 días tras la reparación, obteniendo resultados satisfactorios en términos de restauración de la capacidad estructural (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.6 Equipos Necesarios

5.4.6.1. Bombas de inyección. Para inyectar la resina bajo presión en las grietas del pavimento.

5.4.6.2. Equipos de mezcla. Para asegurar la homogeneidad de la mezcla de concreto y resina (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.7 Limitaciones Actuales

5.4.7.1. Dependencia del clima. La efectividad del curado de la resina depende de la temperatura y condiciones climáticas durante la aplicación (Calizaya Romero, 2022b).

5.4.8 Futuras Áreas de Investigación

5.4.8.1. Optimización del uso de resinas. Desarrollar nuevas formulaciones de resinas epóxicas que ofrezcan un curado más rápido o que sean efectivas en condiciones más extremas (Calizaya Romero, 2022b).

5.5. Capacidad de autocuración bajo tensión de materiales compuestos cementicios reforzados con fibras de endurecimiento ultrarrápido

5.5.1 Fundamentos

Este estudio investiga la capacidad de autocuración de los compuestos cementicios reforzados con fibras (FRCC) de endurecimiento ultra rápido (URH) bajo tensión. Los compuestos URH son ampliamente utilizados en la reparación de infraestructuras debido a su rápida ganancia de resistencia y excelente trabajabilidad. El autocurado es una propiedad emergente en estos compuestos, crucial para prolongar la vida útil de las estructuras y reducir la necesidad de reparaciones futuras (Chun et al., 2023).

5.5.2 Funcionamiento

Los compuestos cementicios URH reforzados con fibras de polietileno (PE) de diferentes longitudes y fracciones de volumen fueron predañados y sometidos a ciclos de curado húmedo-seco para evaluar su capacidad de autocuración. Las fibras de longitud media (9 mm) con una fracción de volumen del 2% demostraron la mejor capacidad de autocuración, logrando un incremento en la resistencia a la tracción de hasta un 47.5% después de 30 ciclos (Chun et al., 2023).

5.5.3 Ventajas

5.5.3.1. Autocuración efectiva. La capacidad de autocuración permite la recuperación parcial de la resistencia a la tracción y la absorción de energía, lo que es clave para la durabilidad a largo plazo de las estructuras reparadas.

5.5.3.2. Durabilidad mejorada. La formación de cristales de CaCO_3 en las microfisuras de menos de 50 μm contribuye a la recuperación estructural sin necesidad de intervenciones adicionales (Chun et al., 2023).

5.5.4 *Análisis de los Materiales Empleados*

5.5.4.1. Fibras de Polietileno (PE). Se utilizaron fibras de tres longitudes diferentes (6, 9 y 12 mm) y en fracciones de volumen de 1.0%, 1.5% y 2.0%. La longitud de la fibra mostró ser más influyente que la fracción de volumen en la capacidad de autocuración (Chun et al., 2023).

5.5.5 *Procedimientos*

5.5.5.1. Preparación de las muestras. Se incorporaron las fibras de PE a la mezcla de cemento URH, se sometieron a predazos controlados y luego a ciclos de curado húmedo-seco.

5.5.5.2. Evaluación de la capacidad de autocuración. Se midieron las propiedades de tracción, la densidad de energía de deformación y la recuperación de la capacidad de absorción de energía, correlacionándolas con el índice de refuerzo de fibra (FRI).

5.5.5.3. Verificación mediante microscopía electrónica. Se analizaron las microfisuras y la composición química de los productos de autocuración mediante SEM y espectroscopía de rayos X (Chun et al., 2023).

5.5.6 *Equipos Necesarios*

5.5.6.1. Cámara de curado húmedo-seco. Para someter las muestras a ciclos de curado que promuevan el proceso de autocuración.

5.5.6.2. Microscopio electrónico de barrido (SEM). Para analizar las microfisuras y la formación de productos de autocuración a nivel microscópico (Chun et al., 2023).

5.5.7 *Limitaciones Actuales*

5.5.7.1. Capacidad de autocuración limitada. Aunque se observó una recuperación significativa de la resistencia, la capacidad de deformación disminuyó, lo que sugiere que el

proceso de autocuración puede no ser suficiente para recuperar completamente las propiedades originales de la muestra (Chun et al., 2023).

5.5.8 Futuras Áreas de Investigación

- Optimización de la fracción de volumen y longitud de las fibras: Para maximizar la capacidad de autocuración sin comprometer otras propiedades mecánicas.
- Desarrollo de nuevos compuestos cementicios URH con mejoradas propiedades de autocuración bajo diversas condiciones de tensión y fatiga(Chun et al., 2023)

5.6. Propiedades autógenas de autocuración del macadán estabilizado con cemento tras microfisuración

5.6.1 Fundamentos

El macadán estabilizado con cemento (CSM) es un material de base semirrígido ampliamente utilizado en la ingeniería de carreteras debido a su alta resistencia y estabilidad. Sin embargo, durante el proceso de curado, pueden aparecer microfisuras que, si no se controlan, pueden afectar la integridad del pavimento. Este estudio investiga la capacidad de autocuración del CSM después de la aparición de microfisuras, lo que es crucial para prevenir daños graves en la estructura del pavimento a largo plazo (He et al., 2021).

5.6.2 Funcionamiento

El estudio desarrolló un modelo de control para el grado de microfisuración utilizando el método de superficie de respuesta (RSM). Se produjeron y probaron especímenes con diferentes grados de microfisuración para analizar los efectos en las propiedades mecánicas y la estructura mesoscópica durante el proceso de curado. Se encontró que el grado de microfisuración tenía un efecto más significativo en las características de autocuración en comparación con el tiempo de microfisuración (He et al., 2021).

5.6.3 *Ventajas*

5.6.3.1. Autocuración efectiva. El CSM demostró una buena capacidad de autocuración después de la microfisuración, lo que permite la recuperación parcial de la resistencia y la estructura sin necesidad de intervenciones adicionales.

5.6.3.2. Control de fisuración. La técnica de microfisuración controlada a un 40% fue óptima, permitiendo que más del 90% de las microfisuras fueran curadas efectivamente, lo que mejora la durabilidad del pavimento (He et al., 2021).

5.6.4 *Análisis de los Materiales Empleados*

5.6.4.1. Cemento Portland Ordinario (P.O. 42.5). Utilizado como el material cementicio principal para estabilizar el macadán, garantizando la formación de microfisuras controladas durante el proceso de curado.

5.6.4.2. Agregados de piedra caliza. Clasificados en diferentes tamaños para garantizar una distribución uniforme y un rendimiento óptimo del material en el proceso de microfisuración (He et al., 2021).

5.6.5 *Procedimientos*

5.6.5.1. Preparación de especímenes. Se prepararon especímenes de CSM con grados de microfisuración del 30%, 40% y 50% para evaluar su capacidad de autocuración.

5.6.5.2. Pruebas de resistencia mecánica. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión no confinada (UCS), resistencia a la tracción indirecta (ITS) y módulo de resiliencia compresiva (CRM) para cuantificar la recuperación de las propiedades mecánicas.

5.6.5.3. Análisis microscópico. Se estudió la microestructura de las fisuras para entender el mecanismo de autocuración y la eficacia de la técnica en la práctica (He et al., 2021).

5.6.6 Equipos Necesarios

5.6.6.1. Prensa hidráulica. Para aplicar cargas controladas durante el proceso de microfisuración.

5.6.6.2. Microscopio electrónico. Para analizar la estructura mesoscópica de las fisuras y verificar la autocuración.

5.6.6.3. Software de modelado RSM. Para establecer y ajustar el modelo de control del grado de microfisuración (He et al., 2021).

5.6.7 Limitaciones Actuales

5.6.7.1. Influencia limitada del tiempo de microfisuración. Aunque la técnica es efectiva, el tiempo de microfisuración mostró menos influencia en la capacidad de autocuración en comparación con el grado de microfisuración, lo que podría requerir ajustes en las prácticas de aplicación (He et al., 2021).

5.6.8 Futuras Áreas de Investigación

5.6.8.1. Optimización del modelo RSM. Mejorar el control sobre el grado de microfisuración para maximizar la capacidad de autocuración sin comprometer la integridad estructural del pavimento.

5.6.8.2. Aplicaciones prácticas de la técnica de microfisuración. Evaluar la viabilidad y efectividad de la técnica en diversas condiciones ambientales y en diferentes tipos de pavimentos (He et al., 2021).

5.7. Propiedades autocurativas de microcápsulas compuestas a base de alginato sódico/resina de melamina-fenol-formaldehído

5.7.1 Fundamentos

Este estudio aborda la síntesis y las propiedades de autocuración de microcápsulas compuestas basadas en alginato de sodio y resina melamina-fenol-formaldehído (MPF) con resina epóxica en su núcleo. Las microcápsulas se diseñaron para mejorar la durabilidad de materiales de construcción como el concreto, al proporcionar una capacidad de autocuración para microfisuras y daños locales que ocurren inevitablemente en estas estructuras (Jiang et al., 2021).

5.7.2 Funcionamiento

Las microcápsulas SA/MPF-E44 fueron preparadas mediante polimerización in situ, utilizando alginato de sodio para mejorar la estabilidad del sistema de emulsión y reducir el tamaño de las partículas. La resina epóxica contenida en las microcápsulas se libera cuando se generan microfisuras, permitiendo la reparación del material dañado. Este proceso de autocuración fue estudiado utilizando simulaciones de dinámica molecular y se verificó mediante ensayos mecánicos y análisis microscópicos (Jiang et al., 2021).

5.7.3 Ventajas

5.7.3.1. Capacidad de autocuración efectiva. Las microcápsulas demostraron ser efectivas en la reparación de microfisuras, mejorando la resistencia a la compresión del mortero de cemento que contenía un 4% de microcápsulas.

5.7.3.2. Reducción del tamaño de partículas. El uso de alginato de sodio promovió una mejor emulsión, lo que resultó en un tamaño promedio de partícula de aproximadamente 55.24 μm y una tasa de recubrimiento del 64.93%(Jiang et al., 2021).

5.7.4 *Análisis de los Materiales Empleados*

5.7.4.1. Alginato de sodio y resina melamina-fenol-formaldehído (SA/MPF).

Utilizados como materiales de pared para las microcápsulas, proporcionando estabilidad y mejorando las propiedades mecánicas del concreto.

5.7.4.2. Resina epóxica E-44. Actúa como el agente de reparación dentro de las microcápsulas, liberándose cuando se generan microfisuras y solidificándose para restaurar la integridad del material (Jiang et al., 2021).

5.7.5 *Procedimientos*

5.7.5.1. Preparación de microcápsulas. Las microcápsulas se prepararon mediante polimerización in situ, integrando alginato de sodio con la resina melamina-fenol-formaldehído durante la condensación.

5.7.5.2. Pruebas de resistencia a la compresión. Se realizaron pruebas en muestras de mortero de cemento con diferentes porcentajes de microcápsulas para evaluar su capacidad de autocuración y su rendimiento mecánico (Jiang et al., 2021).

5.7.6 *Equipos Necesarios*

5.7.6.1. Microscopio electrónico de barrido (SEM). Para observar la morfología superficial de las microcápsulas y confirmar su estructura de núcleo-pared.

5.7.6.2. Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR). Para analizar los cambios en los grupos funcionales y la estabilidad térmica de las microcápsulas (Jiang et al., 2021).

5.7.7 Limitaciones Actuales

5.7.7.1. Mejora en la esfericidad y tasa de recubrimiento. Aunque las microcápsulas mostraron buenas propiedades de autocuración, aún es necesario mejorar la esfericidad y la tasa de recubrimiento para aplicaciones más eficientes (Jiang et al., 2021).

5.7.8 Futuras Áreas de Investigación

5.7.8.1. Optimización de la formulación de microcápsulas. Investigar cómo mejorar aún más la estabilidad y la efectividad de las microcápsulas en aplicaciones a gran escala en la construcción.

5.7.8.2. Desarrollo de materiales más ecológicos. Explorar la posibilidad de reducir el uso de formaldehído y otros materiales tóxicos en la producción de microcápsulas, para alinearse con los objetivos de desarrollo sostenible (Jiang et al., 2021).

5.8. Investigación experimental de la tenacidad a la fractura en modo I de hormigón agrietado real reparado con epoxi

5.8.1 Fundamentos

Este estudio investiga las propiedades de fractura del hormigón con grietas reales que ha sido reparado con resina epoxi, enfocándose en la tenacidad a la fractura en el modo I. La resina epoxi es ampliamente utilizada para la reparación de grietas en estructuras de hormigón debido a su alta resistencia a la tracción, baja retracción y rápida capacidad de endurecimiento, lo que la convierte en un material ideal para la rehabilitación de estructuras dañadas (Kan et al., 2021).

5.8.2 Funcionamiento

El comportamiento de fractura del hormigón reparado con resina epoxi se evaluó mediante ensayos de flexión en tres puntos utilizando vigas con entalla única (SEN) para simular grietas

reales. Se emplearon dos modelos de fractura recomendados por RILEM: el modelo de dos parámetros de Jenq y Shah y el modelo ficticio de Hillerborg para determinar la tenacidad a la fractura y la energía de fractura, respectivamente. Los resultados mostraron que la incorporación de mortero de resina epoxi mejora significativamente la tenacidad a la fractura y la ductilidad del hormigón reparado(Kan et al., 2021).

5.8.3 Ventajas

5.8.3.1. Mejora en la tenacidad a la fractura. La resina epoxi y el mortero epoxi incrementan la resistencia a la fractura del hormigón reparado, haciéndolo más dúctil en comparación con el hormigón sin reparar.

5.8.3.2. Versatilidad en la reparación. Los resultados indican que las propiedades de fractura del hormigón reparado mejoran con el aumento del contenido de arena fina en el mortero de resina epoxi, hasta un nivel que mantiene la trabajabilidad adecuada(Kan et al., 2021).

5.8.4 Análisis de los Materiales Empleados

5.8.4.1. Resina Epoxi. Utilizada para reparar grietas en el hormigón, mejorando la adhesión entre las superficies agrietadas y restaurando la capacidad de carga y resistencia a la fractura.

5.8.4.2. Mortero Epoxi. Compuesto por resina epoxi mezclada con diferentes contenidos de arena fina, utilizado para rellenar y reparar grietas de diversas anchuras en el hormigón(Kan et al., 2021).

5.8.5 Procedimientos

5.8.5.1. Preparación de muestras de hormigón agrietado. Se generaron grietas en las vigas de hormigón mediante pruebas de carga para simular las condiciones reales de daño.

5.8.5.2. Reparación de grietas con resina epoxi. Las grietas se repararon utilizando mortero de resina epoxi, y se realizaron ensayos de flexión en tres puntos para evaluar las propiedades de fractura.

5.8.5.3. Evaluación de la tenacidad a la fractura. Se utilizaron los modelos de Jenq y Shah y Hillerborg para analizar la energía de fractura y la resistencia del hormigón reparado (Kan et al., 2021).

5.8.6 Equipos Necesarios

5.8.6.1. Máquina de ensayos de flexión en tres puntos. Para realizar las pruebas de fractura en las vigas de hormigón con entalla única (SEN).

5.8.6.2. Instrumentos para medir la anchura de grietas. Para evaluar la influencia del contenido de arena fina en la resistencia a la fractura del hormigón reparado (Kan et al., 2021).

5.8.7 Limitaciones Actuales

5.8.7.1. Variabilidad en la reparación. Aunque la resina epoxi mejora significativamente las propiedades de fractura, la efectividad de la reparación puede variar dependiendo del contenido de arena fina y las condiciones de la grieta original (Kan et al., 2021).

5.8.8 Futuras Áreas de Investigación

5.8.8.1. Optimización de la mezcla de mortero epoxi. Investigar la relación óptima de componentes para maximizar la tenacidad a la fractura sin comprometer la trabajabilidad del mortero.

5.8.8.2. Evaluación a largo plazo. Estudiar la durabilidad y comportamiento a largo plazo del hormigón reparado con resina epoxi bajo condiciones ambientales adversas (Kan et al., 2021).

5.9. La aplicación de polímero superabsorbente recubierto en el cemento de pozo para taponar la microfisura

5.9.1 Fundamentos

El uso de polímeros superabsorbentes (SAP) en cementos para pozos ha sido propuesto para sellar microfisuras en la camisa de cemento, una capa esencial para la integridad de los pozos de petróleo y gas, así como para la captura de CO₂ y la explotación de energía geotérmica. Sin embargo, el SAP puede tener efectos adversos sobre la bombeabilidad, resistencia e integridad del cemento. Para mitigar estos efectos, este estudio introduce el uso de SAP recubierto con una combinación de yeso y quitosano, mejorando la capacidad de sellado sin comprometer las propiedades del cemento (Liu et al., 2016).

5.9.2 Funcionamiento

El SAP recubierto se utiliza para taponar microfisuras en la camisa de cemento. Se aplicó la teoría de percolación para calcular la dosis óptima de SAP recubierto, estableciendo un umbral de 28.40% para asegurar el taponamiento efectivo de las microfisuras. Se desarrolló un método para fabricar microfisuras cuantitativas y se utilizó un instrumento diseñado específicamente para probar el rendimiento de sellado de las microfisuras (Liu et al., 2016).

5.9.3 Ventajas

5.9.3.1. Sellado efectivo de microfisuras. El SAP recubierto con yeso y quitosano demostró una capacidad efectiva para sellar microfisuras en el cemento, mejorando la integridad de la camisa de cemento en pozos.

5.9.3.2. Reducción de efectos adversos. El recubrimiento del SAP minimiza los efectos negativos sobre la bombeabilidad y la viscosidad de la lechada de cemento, manteniendo la integridad del material durante la inyección (Liu et al., 2016).

5.9.4 *Análisis de los Materiales Empleados*

5.9.4.1. Polímero Superabsorbente (SAP). Utilizado para absorber agua y sellar microfisuras en la estructura del cemento.

5.9.4.2. Recubrimiento de yeso y quitosano. Aplicado al SAP para mejorar su desempeño en el cemento, reduciendo los efectos adversos sobre la bombeabilidad y la viscosidad de la lechada (Liu et al., 2016).

5.9.5 *Procedimientos*

5.9.5.1. Preparación de SAP recubierto. Se recubrieron las microesferas de SAP con una capa de yeso y quitosano para controlar su absorción inicial de agua y mejorar su dispersión en la matriz de cemento.

5.9.5.2. Pruebas de absorción de agua. Se evaluó la capacidad de absorción de agua del SAP en el filtrado de la lechada de cemento y en agua corriente a 75 °C, observando su estabilidad y eficiencia después de 10 minutos.

5.9.5.3. Evaluación del rendimiento de taponamiento. Se utilizó un instrumento diseñado específicamente para medir la efectividad del SAP recubierto en el taponamiento de microfisuras en la camisa de cemento (Liu et al., 2016).

5.9.6 *Equipos Necesarios*

5.9.6.1. Instrumento de prueba de taponamiento. Diseñado para evaluar la capacidad del SAP recubierto en sellar microfisuras en cementos para pozos.

5.9.6.2. Instrumentos de medición de absorción de agua. Para analizar la capacidad de absorción de agua del SAP en diferentes entornos, simulando condiciones de pozo (Liu et al., 2016).

5.9.7 Limitaciones Actuales

5.9.7.1. Efectos sobre la bombeabilidad. Aunque el recubrimiento mitiga los efectos adversos, el SAP aún puede afectar la bombeabilidad del cemento si no se controla adecuadamente la cantidad utilizada (Liu et al., 2016).

5.9.8 Futuras Áreas de Investigación

5.9.8.1. Optimización de la formulación de SAP recubierto. Investigar combinaciones de materiales de recubrimiento que mejoren aún más el rendimiento del SAP sin comprometer la integridad del cemento.

5.9.8.2 Aplicaciones en diferentes condiciones de pozos. Evaluar la eficacia del SAP recubierto en diferentes tipos de pozos y condiciones operativas para asegurar su aplicabilidad generalizada (Liu et al., 2016).

5.10. Preparación y propiedades técnicas de materiales de inyección epóxicos de baja viscosidad modificados con silicona para la reparación de microfisuras

5.10.1 Fundamentos

Las microfisuras en el pavimento de concreto de puentes fundido en sitio son comunes debido a la influencia de la temperatura ambiental y la humedad, lo que afecta negativamente su durabilidad. Este estudio propone el uso de materiales de inyección de epoxi de baja viscosidad, modificados con silicona y diluyentes activos, para la reparación efectiva de microfisuras en pavimentos de puentes. Se determinó el proceso óptimo de preparación de estos materiales de inyección para mejorar sus propiedades mecánicas y su capacidad de penetración en microfisuras de menos de 1 mm (C. Wang et al., 2021).

5.10.2 Funcionamiento

Se emplearon diluyentes activos (AD-I, AD-II y AD-III) para reducir la viscosidad de la resina epoxi, lo que permitió su uso en la reparación de microfisuras. Además, se utilizó DDMS como agente modificador de silicona para mejorar la trabajabilidad y la adaptabilidad ambiental del material. El proceso óptimo de preparación incluyó una temperatura de reacción de 100 °C, un tiempo de reacción de 3 horas, y un contenido de DDMS del 11%. Este proceso resultó en materiales de inyección capaces de rellenar microfisuras de hasta 10 cm de profundidad en 5 minutos a 25 °C (C. Wang et al., 2021).

5.10.3 Ventajas

5.10.3.1. Mejora en la capacidad de relleno de fisuras. El material de inyección modificado con silicona demostró una excelente capacidad para rellenar microfisuras profundas en pavimentos de puentes, mejorando su durabilidad.

5.10.3.2. Propiedades mecánicas mejoradas. El material de inyección modificado con DDMS mostró un aumento significativo en la resistencia al impacto, la resistencia al cizallamiento y la resistencia a la tracción después del curado (C. Wang et al., 2021).

5.10.4 Análisis de los Materiales Empleados

5.10.4.1. Resina epoxi de baja viscosidad modificada con silicona (DDMS). Se utilizó como material base para la inyección de microfisuras, mejorando sus propiedades de trabajabilidad y resistencia mecánica bajo diversas condiciones ambientales.

5.10.4.2. Diluyentes activos (AD-I, AD-II, AD-III). Utilizados para reducir la viscosidad de la resina epoxi y facilitar su penetración en las microfisuras, sin comprometer significativamente sus propiedades térmicas o mecánicas (C. Wang et al., 2021).

5.10.5 Procedimientos

5.10.5.1. Preparación del material de inyección. Se realizaron pruebas ortogonales para determinar la mejor combinación de temperatura, tiempo de reacción y concentración de DDMS para optimizar las propiedades mecánicas del material.

5.10.5.2. Pruebas de relleno de microfisuras. Se diseñó un experimento para simular la capacidad de relleno de microfisuras en pavimentos de puentes, evaluando la profundidad de relleno y el tiempo de gelificación a diferentes temperaturas (C. Wang et al., 2021).

5.10.6 Equipos Necesarios

5.10.6.1. Instrumentos para la medición de viscosidad y tiempo de gelificación. Para evaluar la capacidad de trabajo del material de inyección en diferentes condiciones.

5.10.6.2. Máquina de ensayos de tracción y cizallamiento. Para medir las propiedades mecánicas del material después del curado (C. Wang et al., 2021).

5.10.7 Limitaciones Actuales

5.10.7.1. Tiempo de gelificación prolongado. Aunque el material muestra excelentes propiedades de relleno, su tiempo de gelificación es relativamente largo (24-28 horas), lo que puede limitar su uso en aplicaciones que requieren tiempos de curado rápidos (C. Wang et al., 2021).

5.10.8 Futuras Áreas de Investigación

5.10.8.1. Optimización del tiempo de gelificación. Investigar formas de reducir el tiempo de gelificación sin comprometer las propiedades mecánicas del material de inyección.

5.10.8.2. Aplicación en diferentes condiciones ambientales. Evaluar el rendimiento del material de inyección en una variedad de condiciones ambientales extremas para asegurar su eficacia en diversas regiones geográficas (C. Wang et al., 2021).

5.11. Visualización y cuantificación de los comportamientos de autocuración de microfisuras en materiales a base de cemento que incorporan microcápsulas de autocuración marcadas con fluorescencia

5.11.1 Fundamentos

Este estudio explora el uso de microcápsulas de autocuración etiquetadas con fluorescencia para visualizar y cuantificar los procesos de autocuración de microfisuras en materiales a base de cemento. La tecnología de microcápsulas fluorescentes permite no solo la reparación de microfisuras, sino también la detección y seguimiento visual de las rutas de curación dentro de la matriz del cemento, proporcionando una nueva metodología para caracterizar la eficiencia del proceso de autocuración en estos materiales (X. Wang et al., 2022b).

5.11.2 Funcionamiento

Las microcápsulas de autocuración etiquetadas con fluorescencia se integran en materiales a base de cemento y se activan cuando aparecen microfisuras, liberando su contenido para reparar las áreas dañadas. La fluorescencia permite visualizar el proceso de curación utilizando técnicas de microscopía confocal de escaneo láser (LSCM) y perfilador de pasos, y cuantificar la eficiencia de curación en términos de cambios en el ancho y profundidad de las microfisuras (X. Wang et al., 2022b).

5.11.3 Ventajas

5.11.3.1. Visualización del proceso de curación. Las microcápsulas etiquetadas con fluorescencia permiten observar y seguir visualmente el camino de curación de las microfisuras dentro de la matriz del cemento, lo que es difícil de lograr con otros métodos de detección.

5.11.3.2. Cuantificación de la eficiencia de curación. El uso de fluorescencia permite una medición precisa de la reducción en el tamaño de las microfisuras, proporcionando una evaluación cuantitativa de la eficiencia del proceso de autocuración (X. Wang et al., 2022b).

5.11.4 Análisis de los Materiales Empleados

5.11.4.1. Microcápsulas de autocuración etiquetadas con fluorescencia. Contienen un núcleo de resina epoxi etiquetado con fluorescencia, encapsulado en una pared de urea-formaldehído, que se libera cuando se forman microfisuras, reparando el daño y permitiendo la visualización del proceso de curación (X. Wang et al., 2022b).

5.11.5 Procedimientos

5.11.5.1. Preparación de microcápsulas fluorescentes. Las microcápsulas se prepararon mediante polimerización in situ, etiquetando el núcleo de resina epoxi con fluoresceína sódica.

5.11.5.2. Pruebas de curación y visualización. Se incorporaron microcápsulas en materiales a base de cemento y se utilizó LSCM y perfilador de pasos para visualizar y cuantificar el proceso de curación de las microfisuras en diferentes etapas (X. Wang et al., 2022b).

5.11.6 Equipos Necesarios

5.11.6.1. Microscopía confocal de escaneo láser (LSCM). Para visualizar y seguir el proceso de curación de microfisuras en tiempo real.

5.11.6.2. Perfilador de pasos. Para cuantificar los cambios en la anchura y profundidad de las microfisuras durante el proceso de curación (X. Wang et al., 2022b).

5.11.7 Limitaciones Actuales

5.11.7.1. Impacto limitado en la resistencia inicial. Aunque las microcápsulas mejoran la curación de microfisuras, su incorporación puede tener un efecto negativo mínimo en la resistencia inicial del material a base de cemento (X. Wang et al., 2022b).

5.11.8 Futuras Áreas de Investigación

5.11.8.1. Optimización del contenido de microcápsulas. Investigar la proporción óptima de microcápsulas fluorescentes para maximizar la eficiencia de curación sin comprometer las propiedades mecánicas iniciales.

5.11.8.2. Aplicación en estructuras a gran escala. Evaluar la viabilidad de aplicar esta tecnología en la reparación de microfisuras en infraestructuras civiles a gran escala (X. Wang et al., 2022b).

5.12. Efectos de las microfisuras por contracción autógena en el UHPC: Perspectivas de un enfoque de cuantificación de fisuras basado en el aprendizaje automático

5.12.1 Fundamentos

El hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) es conocido por sus excelentes propiedades mecánicas y durabilidad. Sin embargo, el encogimiento autógeno puede provocar microfisuras que afectan negativamente la estabilidad dimensional y la integridad estructural del UHPC. Este estudio investiga el impacto de las microfisuras inducidas por el encogimiento autógeno en la microestructura del UHPC y su influencia en las propiedades mecánicas. Además, se utiliza un enfoque basado en el aprendizaje automático para cuantificar las microfisuras y comprender mejor su efecto en el rendimiento global del UHPC (Zeng et al., 2024).

5.12.2 Funcionamiento

El estudio utilizó un método de procesamiento de imágenes basado en aprendizaje automático y técnicas estereológicas para segmentar y cuantificar las microfisuras en el UHPC. La incorporación de nanocelulosa (NC) se exploró como una forma de mitigar el encogimiento autógeno y reducir la densidad de microfisuras. Los resultados mostraron que la adición de NC redujo el ancho y el área de las microfisuras en un 57.45% a 70.55% y 63.2% a 83.8%, respectivamente. Sin embargo, la adición de NC también introdujo una mayor proporción de poros, lo que afectó negativamente la resistencia a la compresión, aunque mejoró la resistencia a la flexión en un 66.02% (Zeng et al., 2024).

5.12.3 Ventajas

5.12.3.1. Reducción significativa de microfisuras. La incorporación de nanocelulosa (NC) redujo notablemente la densidad y el tamaño de las microfisuras, mejorando la resistencia a la flexión del UHPC.

5.12.3.2. Mitigación del encogimiento autógeno. La NC actúa como un agente de curado interno, reteniendo y liberando agua para compensar el encogimiento autógeno, lo que ayuda a mantener la integridad estructural del UHPC (Zeng et al., 2024).

5.12.4 Análisis de los Materiales Empleados

5.12.4.1. Nanocelulosa (NC). Utilizada como aditivo para reducir el encogimiento autógeno en el UHPC. La NC posee propiedades hidrofílicas e higroscópicas, lo que le permite actuar como un agente de curado interno y reforzador nanoestructural en el concreto.

5.12.4.2. Humo de sílice (SF). Aunque mejora la densidad de empaquetamiento y la microestructura del UHPC, el SF también aumenta la severidad del encogimiento autógeno y la formación de microfisuras (Zeng et al., 2024).

5.12.5 Procedimientos

5.12.5.1. Preparación de muestras de UHPC. Se prepararon diferentes mezclas de UHPC con variaciones en los contenidos de SF y NC, siguiendo un proceso controlado para garantizar la homogeneidad de la mezcla.

5.12.5.2. Análisis de porosidad y microfisuras. Se realizaron pruebas de porosimetría por intrusión de mercurio (MIP) y microscopía electrónica de barrido (SEM) para evaluar la distribución de poros y la presencia de microfisuras en las muestras curadas.

5.12.5.3. Cuantificación de microfisuras. Se utilizó un enfoque basado en procesamiento de imágenes y aprendizaje automático para cuantificar la longitud, ancho y densidad de las microfisuras, correlacionando estos datos con las propiedades mecánicas del UHPC (Zeng et al., 2024).

5.12.6 Equipos Necesarios

5.12.6.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM). Para analizar la morfología y estructura de las microfisuras en el UHPC.

5.12.6.2. Porosimetría por intrusión de mercurio (MIP). Para cuantificar la distribución y tamaño de los poros en las muestras de UHPC (Zeng et al., 2024).

5.12.7 Limitaciones Actuales

5.12.7.1. Incremento de porosidad. Aunque la NC reduce las microfisuras, también introduce una mayor cantidad de poros en la matriz del UHPC, lo que puede afectar la resistencia a la compresión de las mezclas.

5.12.7.2. Dificultades en la dispersión de NC. La dispersión de la nanocelulosa en la mezcla puede ser desigual, lo que introduce variabilidad en los resultados y puede afectar negativamente las propiedades mecánicas del UHPC (Zeng et al., 2024).

5.12.8 Futuras Áreas de Investigación

5.12.8.1. Optimización del contenido de NC. Investigar la cantidad óptima de NC que maximice los beneficios de la reducción del encogimiento autógeno sin comprometer la resistencia a la compresión.

5.12.8.2. Mejora en las técnicas de dispersión. Desarrollar métodos para mejorar la dispersión de la NC en la matriz de UHPC para asegurar una distribución uniforme y reducir la introducción de poros (Zeng et al., 2024).

5.13. Comportamiento autorregenerativo de microfisuras múltiples de compuestos cementicios de endurecimiento por deformación (SHCC) Fundamentos

El Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC) es un material que exhibe múltiples microfisuras cuando se somete a cargas de flexión o tracción. Este estudio investiga el comportamiento de autocuración de estas microfisuras en SHCC, enfocándose en la influencia del ancho de la fisura en el grado de sellado y en la reducción de la absorción de agua. El SHCC es particularmente relevante en la construcción debido a su capacidad de mitigar la formación de fisuras anchas, lo que mejora la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado (Zhang et al., 2018).

5.13.1 Funcionamiento

Los especímenes de SHCC fueron predañados mediante pruebas de flexión en tres puntos para inducir múltiples microfisuras. Posteriormente, fueron expuestos a diferentes condiciones ambientales (niebla de agua, ciclos de agua/seco, y solución saturada de $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{seco}$) para evaluar su capacidad de autocuración. Se realizaron observaciones microscópicas y pruebas de

absorción de agua por gravimetría y radiografía de neutrones para estudiar el comportamiento de autocuración bajo estas condiciones. Los resultados indicaron que la solución de Ca(OH)_2 promueve el proceso de autocuración debido a la reacción puzolánica del contenido de ceniza volante en el SHCC (Zhang et al., 2018).

5.13.2 Ventajas

5.13.2.1. Curación efectiva en microfisuras finas. Las microfisuras con un ancho de 10–20 μm mostraron una curación completa bajo las condiciones de exposición adecuadas.

5.13.2.2. Reducción de la absorción de agua. El sellado de las microfisuras resultó en una reducción significativa de la absorción capilar de agua, lo que mejora la durabilidad del SHCC frente a la penetración de líquidos agresivos (Zhang et al., 2018).

5.13.3 Análisis de los Materiales Empleados

5.13.3.1. Cemento Portland Ordinario (Tipo 42.5). Utilizado como base del SHCC, mezclado con ceniza volante y arena fina para formar la matriz cementicia.

5.13.3.2. Fibras de alcohol polivinílico (PVA). Incorporadas en un 2% en volumen, con un diámetro de 40 μm y longitud de 12 mm, para promover la formación de microfisuras en lugar de fisuras amplias (Zhang et al., 2018).

5.13.4 Procedimientos

5.13.4.1. Preparación de especímenes de SHCC. Se prepararon y predañaron especímenes mediante pruebas de flexión en tres puntos para inducir microfisuras controladas.

5.13.4.2. Exposición a condiciones de curación. Los especímenes predañados fueron expuestos a tres condiciones de curación diferentes para evaluar el grado de sellado de las microfisuras y su relación con la absorción de agua.

5.13.4.3. Evaluación de la curación. Se utilizó la microscopía y la radiografía de neutrones para visualizar y cuantificar el proceso de autocuración, correlacionando los datos con el ancho de las microfisuras y la duración del curado (Zhang et al., 2018).

5.13.5 Equipos Necesarios.

5.13.5.1. Microscopio para observación de microfisuras. Para caracterizar el patrón de fisuración inicial y el grado de curación en los especímenes de SHCC.

5.13.5.2. Radiografía de neutrones. Para visualizar la distribución de agua y evaluar la efectividad del sellado de microfisuras tras el proceso de autocuración (Zhang et al., 2018).

5.13.6 Limitaciones Actuales

5.13.6.1. Curación lenta. El proceso de autocuración es relativamente lento, incluso en presencia de agua o solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, y las microfisuras más anchas ($>20\ \mu\text{m}$) no se curan completamente bajo las condiciones estudiadas (Zhang et al., 2018).

5.13.7 Futuras Áreas de Investigación

5.13.7.1. Optimización de las condiciones de curación. Investigar cómo mejorar la eficiencia de la autocuración en microfisuras más anchas y en condiciones de curado más variadas.

5.13.7.2. Aplicaciones en estructuras reales. Evaluar la eficacia del SHCC autocurable en aplicaciones prácticas y en diferentes entornos ambientales para validar su desempeño a largo plazo (Zhang et al., 2018).

5.14. Inyección de sílice a baja presión para reducir la porosidad en materiales cementosos

5.14.1 Fundamentos

Este estudio presenta una técnica innovadora y no destructiva de tratamiento de superficies de cemento mediante la inyección de nano-sílice a baja presión para reducir la porosidad en materiales cementosos. La técnica se diseñó principalmente para la conservación de edificios históricos y la mejora de la durabilidad de infraestructuras existentes. La nano-sílice y el humo de sílice son capaces de penetrar en la superficie del cemento, reaccionando con el hidróxido de calcio presente de manera natural para formar hidrato de silicato de calcio (C-S-H), un compuesto que mejora la resistencia y reduce la permeabilidad del material (Maddalena & Hamilton, 2017).

5.14.2 Funcionamiento

La inyección de sílice se realiza bajo una presión baja de aproximadamente 20 kPa, lo que permite que las partículas de nano-sílice penetren en la estructura porosa del cemento. Este proceso se lleva a cabo durante un periodo de hasta 14 días, dependiendo de la concentración de la suspensión de sílice utilizada. Los resultados mostraron que la inyección de nano-sílice es más efectiva que la del humo de sílice debido a su menor tamaño de partícula, lo que le permite penetrar más profundamente y reaccionar más eficazmente con el portlandita para formar más C-S-H (Maddalena & Hamilton, 2017).

5.14.3 Ventajas

5.14.3.1. Reducción significativa de la porosidad. La técnica de inyección de nano-sílice mostró una reducción de hasta un 30% en la porosidad, mejorando la durabilidad del material cementoso.

5.14.3.2. Método no destructivo. La técnica es simple y no requiere procesos destructivos, lo que la hace adecuada para la conservación de estructuras históricas y para el mantenimiento de infraestructuras críticas (Maddalena & Hamilton, 2017).

5.14.4 *Análisis de los Materiales Empleados*

5.14.4.1. Nano-sílice (NS). Utilizada como una suspensión acuosa para la inyección en cemento hidratado. Sus partículas extremadamente pequeñas permiten una mejor penetración y reacción con el portlandita.

5.14.4.2. Humo de sílice (SF). Aunque también se utiliza para reducir la porosidad, su tamaño de partícula más grande lo hace menos efectivo que la nano-sílice en este contexto (Maddalena & Hamilton, 2017).

5.14.5 *Procedimientos*

5.14.5.1. Preparación de muestras de cemento. Se prepararon discos de cemento hidratado que fueron secados y luego sometidos a inyección de sílice bajo condiciones controladas de temperatura y presión.

5.14.5.2. Inyección de sílice. La inyección se realizó a través de un tubo de PVC durante un periodo que varió entre 7 y 28 días, utilizando diferentes concentraciones de suspensión de sílice.

5.14.5.3. Análisis de porosidad y masa. Se midieron los cambios en la masa y la porosidad antes y después de la inyección, y se utilizaron técnicas como el análisis termogravimétrico (TGA) y la difracción de rayos X (XRD) para caracterizar los productos de hidratación formados (Maddalena & Hamilton, 2017).

5.14.6 *Equipos Necesarios*

5.14.6.1. Microscopía electrónica de barrido (SEM). Para analizar la profundidad de penetración de la sílice y la densificación de la matriz.

5.14.6.2. Análisis termogravimétrico (TGA) y difracción de rayos X (XRD). Para cuantificar la formación de C-S-H y la reducción de portlandita en las muestras tratadas (Maddalena & Hamilton, 2017).

5.14.7 Limitaciones Actuales

5.14.7.1. Eficacia limitada por la concentración de sílice. Aunque la inyección de sílice es efectiva, la concentración y el tiempo de inyección juegan un papel crucial en la reducción de la porosidad. La técnica puede no ser adecuada para todos los tipos de cemento o condiciones ambientales (Maddalena & Hamilton, 2017).

5.14.8 Futuras Áreas de Investigación

5.14.8.1. Optimización de la técnica de inyección. Investigar métodos para aumentar la penetración y reactividad de la sílice, incluyendo la variación de la presión de inyección y el uso de diferentes tipos de sílice.

5.14.8.2. Aplicación en otras estructuras. Evaluar la eficacia de la técnica en una gama más amplia de materiales y estructuras, incluyendo aquellos sometidos a condiciones ambientales extremas (Maddalena & Hamilton, 2017).

5.15. Gestión de dos problemas simultáneos en la reparación del hormigón: La curación de microfisuras y el control de patógenos

5.15.1 Fundamentos

El mantenimiento de estructuras de concreto mediante agentes bacterianos para reparar microfisuras y controlar patógenos es una estrategia prometedora para maximizar la vida útil de las estructuras. Este estudio explora el uso de la cepa *Bacillus altitudinis* B6, que tiene la capacidad de precipitar carbonato de calcio (CCP) y posee actividad antibacteriana significativa contra bacterias Gram-positivas. Esta doble funcionalidad permite reparar microfisuras en el concreto y

controlar la contaminación bacteriana, lo que contribuye a la durabilidad y mantenimiento de las estructuras cementicias (Min et al., 2024).

5.15.2 Funcionamiento

El *Bacillus altitudinis* B6 se aisló de suelos de arrozales y se probó por su capacidad para inducir la precipitación de carbonato de calcio y su actividad antibacteriana. La cepa B6 mostró ser capaz de reparar microfisuras de hasta 0.3 mm en 14 días a través de la formación de vaterita y la producción de sustancias poliméricas extracelulares. Además, el análisis químico identificó la producción de un péptido similar a la tiocilina, que tiene actividad bactericida contra *Staphylococcus aureus* y *Enterococcus faecalis*, al dañar sus membranas celulares (Min et al., 2024).

5.15.3 Ventajas

5.15.3.1. Reparación efectiva de microfisuras. La capacidad de precipitación de carbonato de calcio por *Bacillus altitudinis* B6 permite el sellado de microfisuras, mejorando la integridad estructural del concreto.

5.15.3.2. Control de patógenos. La producción de sustancias antibacterianas por la cepa B6 ayuda a prevenir la contaminación bacteriana durante el proceso de reparación de fisuras, lo que es especialmente importante en aplicaciones donde la higiene es crítica, como en la industria alimentaria (Min et al., 2024).

5.15.4 Análisis de los Materiales Empleados

5.15.4.1. *Bacillus altitudinis* B6. Cepa no ureolítica capaz de precipitar carbonato de calcio y producir sustancias antibacterianas, utilizada para la reparación de microfisuras en concreto.

5.15.4.2. Carbonato de calcio (CCP). Producto de la actividad biológica de la cepa B6, que rellena y sella microfisuras en la matriz cementicia, mejorando la resistencia y durabilidad del concreto (Min et al., 2024).

5.15.5 Procedimientos

5.15.5.1. Aislamiento de la cepa B6. Se aislaron bacterias formadoras de esporas y tolerantes a la alcalinidad a partir de muestras de suelo de arrozales, seleccionando aquellas con capacidad para inducir la precipitación de carbonato de calcio y actividad antibacteriana.

5.15.5.2. Evaluación de la capacidad de curación de fisuras. Se inoculó la cepa B6 en morteros agrietados y se evaluó la reparación de microfisuras mediante microscopia electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X (XRD).

5.15.5.3. Pruebas de actividad antibacteriana. Se realizaron pruebas utilizando el sobrenadante de cultivos de la cepa B6 para evaluar su efectividad contra bacterias Gram-positivas en condiciones de pH elevado (Min et al., 2024).

5.15.6 Equipos Necesarios

5.15.6.1. Microscopio electrónico de barrido (SEM). Para observar la formación de vaterita y el sellado de microfisuras en la matriz cementicia.

5.15.6.2. Espectroscopia de rayos X (XRD). Para analizar la presencia de carbonato de calcio y otras fases cristalinas en el área reparada (Min et al., 2024).

5.15.7 Limitaciones Actuales

5.15.7.1. Eficacia limitada en ambientes no alcalinos. La capacidad de la cepa B6 para reparar microfisuras y controlar patógenos puede verse afectada en ambientes con pH no alcalino, lo que limita su aplicabilidad a ciertas condiciones específicas (Min et al., 2024).

5.15.8 Futuras Áreas de Investigación

5.15.8.1. Optimización de las condiciones de aplicación. Investigar la eficacia de la cepa B6 en diferentes entornos ambientales y tipos de concreto, así como su combinación con otros agentes de reparación biológicos o químicos.

5.15.8.2. Desarrollo de aplicaciones industriales. Evaluar la viabilidad de utilizar esta tecnología en la reparación de infraestructuras críticas y en sectores donde la contaminación bacteriana es una preocupación significativa (Min et al., 2024).

6. Conclusiones

A través de este estudio, se ha confirmado que la técnica de inyección a presión de resinas epóxicas es una solución viable y efectiva para la reparación de microfisuras en elementos de concreto utilizados en infraestructuras viales.

Esta técnica ha demostrado mejorar significativamente la durabilidad y resistencia de las estructuras de concreto, extendiendo su vida útil y reduciendo la necesidad de reparaciones frecuentes. Sin embargo, la aplicación exitosa de esta técnica depende de varios factores críticos, como la selección adecuada de la resina, la preparación cuidadosa de la superficie, y el control preciso de la presión durante la inyección.

Además, aunque las resinas epóxicas son eficaces en la restauración de la integridad estructural, es necesario considerar sus limitaciones, como su sensibilidad a las condiciones ambientales durante el curado y el potencial de expansión térmica que puede comprometer la reparación.

El estudio también ha revelado la importancia de realizar evaluaciones a largo plazo del comportamiento del concreto reparado bajo condiciones reales de servicio. Estas evaluaciones son esenciales para determinar la durabilidad de la reparación y para identificar posibles áreas de mejora en las metodologías actuales.

La investigación futura debe centrarse en la optimización de las formulaciones de resinas para mejorar su desempeño en condiciones extremas, así como en el desarrollo de sistemas automatizados que puedan mejorar la precisión y consistencia del proceso de inyección, reduciendo la posibilidad de errores humanos.

7. Recomendaciones

Se recomienda continuar investigando y desarrollando nuevas formulaciones de resinas epóxicas que ofrezcan un rendimiento mejorado en una variedad de condiciones extremas, incluyendo aplicaciones bajo el agua o en ambientes con grandes fluctuaciones de temperatura. Además, sería beneficioso explorar resinas que presenten una menor sensibilidad al clima durante el proceso de curado.

Dado que la consistencia y precisión del proceso de inyección son cruciales para el éxito de la reparación, se sugiere el desarrollo de sistemas automatizados para la inyección de resinas epóxicas. Estos sistemas podrían incluir mecanismos de monitoreo en tiempo real para ajustar automáticamente la presión de inyección y otros parámetros críticos, mejorando así la calidad y uniformidad de las reparaciones.

Es fundamental llevar a cabo estudios longitudinales que evalúen el comportamiento de las reparaciones realizadas con resinas epóxicas en condiciones reales de servicio a lo largo del tiempo. Estos estudios deberían incluir análisis de la durabilidad, resistencia mecánica, y comportamiento bajo ciclos de carga y descarga. Los resultados de estos estudios ayudarán a refinar las técnicas de inyección y a desarrollar guías más precisas para su aplicación en diferentes tipos de infraestructura.

Además de la optimización de las resinas epóxicas, se recomienda explorar el uso de tecnologías complementarias, como el uso de nanomateriales o aditivos que puedan mejorar aún más las propiedades de las resinas. También sería valioso investigar el impacto de la incorporación de microcápsulas de autocuración y otras innovaciones que podrían aumentar la efectividad de las reparaciones.

Para garantizar la aplicación adecuada de estas técnicas avanzadas, es crucial invertir en la capacitación de ingenieros y técnicos que trabajen en el campo de la reparación de infraestructuras. Los programas de formación deben centrarse en la comprensión profunda de los materiales, equipos, y procedimientos involucrados en la inyección a presión de resinas epóxicas, asegurando que las reparaciones se realicen de manera eficiente y efectiva.

8. Bibliografía

- Calizaya Romero, A. A. (2022a). Sistemas de reparación estructural de pavimento rígido con inyecciones de resinas epóxicas. *Revista Ingeniería*, 6(14), 64–81. <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v6i14.91>
- Calizaya Romero, A. A. (2022b). Sistemas de reparación estructural de pavimento rígido con inyecciones de resinas epóxicas. *Revista Ingeniería*, 6(14), 64–81. <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v6i14.91>
- Ceneño Valdiviezo, A. (2004). Tecnologías novedosas para rehabilitar, restaurar o reestructurar la superestructura. *Diseño y Sociedad*. (16). 54-63.
- Chun, B., Oh, T., Choi, H.-J., Lee, S. K., Banthia, N., & Yoo, D.-Y. (2023). Self-healing capacity of ultra-rapid-hardening fiber-reinforced cementitious composites under tension. *Construction and Building Materials*, 385, 131464. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131464>
- Deng, Y. G., Zhao, B. J., Dai, T. T., Li, G. Q., & Li, Y. (2022). Study on the dispersibility of modified basalt fiber and its influence on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 350, 128839. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128839>
- Euclid Group Toxement. (2019). *Guía de especificación para el tratamiento de fisuras en el concreto*. https://www.Toxement.Com.Co/Media/3896/Spec_fisuras-Comprimido.Pdf.
- García, R. (2019). *Evaluación y reparación de fisuras en estructuras de concreto armado mediante el comité ACI 224 en el Distrito de Vicco – Pasco 2018*. Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.
- Griffin, S., Askarinejad, H., & Farrant, B. (2017). Evaluation of Epoxy Injection Method for Concrete Crack Repair. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 177–181. <https://doi.org/10.18178/ijscer.6.3.177-181>
- He, M., Yu, Z., Ma, S., Kang, A., & Zhang, J. (2021). Autogenous self-healing properties of cement-stabilized macadam after microcracking. *Construction and Building Materials*, 273, 121737. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121737>
- Issa, C. A., & Debs, P. (2007). Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete. *Construction and Building Materials*, 21(1), 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.06.030>

- Jiang, W., Zhou, G., Wang, C., Xue, Y., & Niu, C. (2021). Synthesis and self-healing properties of composite microcapsule based on sodium alginate/melamine-phenol-formaldehyde resin. *Construction and Building Materials*, 271, 121541. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121541>
- Kan, Y.-C., Lee, M.-G., & Lee, H.-W. (2021). Experimental investigation of mode-I fracture toughness of real-cracked concrete repaired by epoxy. *Construction and Building Materials*, 293, 123490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123490>
- Liu, H., Bu, Y., Sanjayan, J. G., Nazari, A., & Shen, Z. (2016). The application of coated superabsorbent polymer in well cement for plugging the microcrack. *Construction and Building Materials*, 104, 72–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.058>
- Maddalena, R., & Hamilton, A. (2017). Low-pressure silica injection for porosity reduction in cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 134, 610–616. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.016>
- Min, J., Son, Y., Jang, I., Yi, C., & Park, W. (2024). Managing two simultaneous issues in concrete repair: Healing microcracks and controlling pathogens. *Construction and Building Materials*, 416, 135125. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135125>
- Mohamed, A. (1996). *Inyección de grandes grietas con resina epoxi*. Universidad Politécnica de Madrid.
- SIKA Group. (2024, July 15). *Reparación y mantenimiento de concreto*. <https://Nic.Sika.Com/Es/Construction/Reparacion-Mantenimiento-Concreto.Html>.
- Tlajji, G., Pennec, F., Ouldboukhite, S., Ibrahim, M., & Biwole, P. (2022). Hygrothermal performance of multilayer straw walls in different climates. *Construction and Building Materials*, 326, 126873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126873>
- Wang, C., Fan, Z., Li, C., Zhang, H., & Xiao, X. (2021). Preparation and engineering properties of low-viscosity epoxy grouting materials modified with silicone for microcrack repair. *Construction and Building Materials*, 290, 123270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123270>
- Wang, X., Li, Y., Zhang, C., & Zhang, X. (2022a). Visualization and quantification of self-healing behaviors of microcracks in cement-based materials incorporating fluorescence-labeled self-healing microcapsules. *Construction and Building Materials*, 315, 125668. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125668>

- Wang, X., Li, Y., Zhang, C., & Zhang, X. (2022b). Visualization and quantification of self-healing behaviors of microcracks in cement-based materials incorporating fluorescence-labeled self-healing microcapsules. *Construction and Building Materials*, 315, 125668. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125668>
- Zeng, X., Deng, Q., Li, S., Gao, H., & Yu, Q. (2024). Effects of autogenous shrinkage microcracks on UHPC: Insights from a machine learning based crack quantification approach. *Construction and Building Materials*, 428, 136400. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136400>
- Zhang, P., Dai, Y., Ding, X., Zhou, C., Xue, X., & Zhao, T. (2018). Self-healing behaviour of multiple microcracks of strain hardening cementitious composites (SHCC). *Construction and Building Materials*, 169, 705–715. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.032>
- Zhang, P., Xu, F., Liu, Y., & Ahmed Sheikh, S. (2022). Shear behaviour of composite beams with permanent UHPC formwork and high-strength steel rebar. *Construction and Building Materials*, 352, 128951. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128951>