



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA CIVIL**

**Efecto de la celulosa y aditivos cristalinos en el sellado de fisuras en un
hormigón convencional sometido a flexión**

Trabajo de Titulación para optar al título de Ingeniero Civil

Autores:

Valle Morocho, Jessica Alejandra

Villarroel Casco, Walter Geovanny

Tutor:

Ing. Tito Castillo, Ph.D.

Riobamba, Ecuador. 2022

DERECHOS DE AUTORÍA

Nosotros, Valle Morocho Jessica Alejandra, con cédula de ciudadanía 060493845-6 y Villarroel Casco Walter Geovanny, con cédula de ciudadanía 060556239-6, autores del trabajo de investigación titulado: “Efecto de la celulosa y aditivos cristalinos en el sellado de fisuras en un hormigón convencional sometido a flexión”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, 11/11/2022



Valle Morocho Jessica Alejandra

C.I: 0604938456



Villarroel Casco Walter Geovanny

C.I: 0605562396

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DE TRIBUNAL;

Quienes suscribimos, catedráticos designados Tutor y Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Efecto de la celulosa y aditivos cristalinos en el sellado de fisuras en un hormigón convencional sometido a flexión** por Jessica Alejandra Valle Morocho, con cédula de identidad número **060493845-6** y Walter Geovanny Villarroel Casco con cédula de identidad **060556239-6**, certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha asesorado durante el desarrollo, revisado y evaluado el trabajo de investigación escrito y escuchada la sustentación por parte de su autor, no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 11/11/2022

Mgs. Vladimir Pazmiño
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Alexis Andrade. M.Sc.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Oscar Cevallos. PhD
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Tito Castillo. PhD
TUTOR



Firma

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Efecto de la celulosa y aditivos cristalinos en el sellado de fisuras en un hormigón convencional sometido a flexión**, presentado por Jessica Alejandra Valle Morocho, con cédula de identidad número **060493845-6** y Walter Geovanny Villarroel Casco con cédula de identidad **060556239-6**, bajo la tutoría de Ing. Tito Castillo, PhD; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 11/11/2022

Mgs. Vladimir Pazmiño
**PRESIDENTE DEL
TRIBUNAL DE GRADO**



Firma

Ing. Alexis Andrade. M.Sc.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma

Ing. Oscar Cevallos. PhD
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Firma



Dirección
Académica
VICERRECTORADO ACADÉMICO

en movimiento



UNACH-RGF-01-04-02.20
VERSIÓN 02: 06-09-2021

CERTIFICACIÓN

Que, **VALLE MOROCHO JESSICA ALEJANDRA** con CC: **060493845-6** y **VILLARROEL CASCO WALTER GEOVANNY** con CC: **060556239-6**, estudiantes de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL, NO VIGENTE**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**EFFECTO DE LA CELULOSA Y ADITIVOS CRISTALINOS EN EL SELLADO DE FISURAS EN UN HORMIGÓN CONVENCIONAL SOMETIDO A FLEXIÓN**", cumple con el 2 %, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio URKUND, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 07 de noviembre de 2022



Ing. Tito Castillo, PhD
TUTOR

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación lo dedico primeramente a Dios, por ser un amigo fiel y un Padre bueno que me ha dado su guía, fuerza y sabiduría para llegar hasta aquí.

A mi mami Clara Morocho, por ser un ejemplo de esfuerzo, sabiduría, fe y valentía, por apoyarme en todo este camino y por su amor incondicional, a mis abuelitos Clara Martínez y Gabriel Morocho, por su crianza como mis segundos padres, por su cariño y ánimo brindado y a mi tía Martha Morocho por su formación, dedicación y amor brindado en mis primeros años de estudio.

Jessica Alejandra Valle Morocho

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento va dirigido a Dios, quien me ha llevado de su mano y me ha mostrado que nada hay imposible, quien me ha dado la sabiduría y la fuerza para conquistar este objetivo.

A mi mami Clara Morocho por su ejemplo de mujer fuerte, valiente, llena de fe y esforzada; por las palabras de ánimos en los momentos difíciles y por todo el apoyo que me ha brindado, familiares y amigos porque de una u otra manera colaboraron para llegar a alcanzar esta meta.

A mi tutor de tesis Ing. Tito Castillo. PhD por brindar su tiempo, conocimiento, y paciencia durante la elaboración de este proyecto; a MSc. Víctor García por el apoyo brindado para la elaboración del proyecto.

A mi amigo y compañero de tesis Walter Villarroel por su apoyo incondicional, esfuerzo y dedicación para llevar a cabo este trabajo de titulación.

A los miembros del tribunal Ing. Oscar Cevallos, PhD e Ing. Alexis Andrade, M.Sc por su colaboración en este proyecto de investigación.

También mi agradecimiento a la Universidad Nacional de Chimborazo, Escuela de Ingeniería Civil y todos los docentes de la carrera cuyo aporte a contribuido a la formación académica de todos los estudiantes.

Efesios 3:20

Y ahora, que toda la gloria sea para Dios, quien puede lograr mucho más de lo que pudiéramos pedir o incluso imaginar mediante su gran poder, que actúa en nosotros.

Jessica Alejandra Valle Morocho

DEDICATORIA

A mi madre Sofía y a mi padre Walter, por su amor, paciencia y dedicación en mi formación a lo largo de todos estos años, sus enseñanzas han dejado una huella indeleble.

A mis abuelitos por su apoyo incondicional en los momentos de frustración.

A mi hermano Jimmy quien fue la motivación para siempre seguir adelante.

A la memoria de mi bisabuelita Celina.

Walter Geovanny Villarroel Casco

AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la oportunidad de tener una carrera, fue siempre la fortaleza y la base para culminar esta meta.

A mi familia por cada momento compartido, por cada enseñanza, y por las palabras de aliento que me llevaron a tener la fuerza suficiente para alcanzar mi objetivo.

A mi tutor de tesis, Ing. Tito Castillo PhD., por su conocimiento, tiempo y paciencia para la realización de este trabajo.

Al Ing. Víctor García PhD., por su predisposición para ayudarnos en este trabajo de investigación, estaré siempre muy agradecido por su apoyo.

A los miembros del tribunal Ing. Oscar Cevallos, PhD e Ing. Alexis Andrade, M.Sc por sus consejos en este proyecto de investigación.

A mi amiga y compañera Jessica, por brindarme su apoyo en todo momento, su fe y su fuerza han sido una pieza fundamental para enfrentar los problemas presentados.

A mis amigos y compañeros que formaron parte de este camino, por los momentos vividos.

Walter Geovanny Villarroel Casco

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I. INTRODUCCION.....	15
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE.....	17
CAPÍTULO III. METODOLOGIA.....	21
1. Elaboración y curado de las probetas.....	22
2. Resistencia a la compresión del hormigón de control	23
3. Fisuración de especímenes.....	23
4. Prueba de ultrasonido (Velocidad de pulso)	23
5. Prueba de autocuración.....	26
6. Medición de ancho de grietas	26
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	28
1. Resistencia a la compresión en el hormigón de control.....	28
2. Velocidad de pulso.....	28
3. Prueba de autocuración.....	34
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES	37
4. Conclusiones.....	37
5. Recomendaciones	38
BIBLIOGRAFIA	39

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dosificación hormigón de control	21
Tabla 2. Dosificaciones de CA y fibra natural (abacá).....	23
Tabla 3. Resistencia a la compresión hormigón de control	28
Tabla 4. Velocidades de onda - Zona 1	28
Tabla 5. Ancho de grieta promedio para cada espécimen	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas principales de investigación	21
Figura 2. Proceso de mezclado de materiales.....	22
Figura 3. Puntos de monitoreo de velocidad de ultrasonido	25
Figura 4. Proceso de análisis de imágenes	27
Figura 5. Algoritmo de procesamiento de imágenes	27
Figura 6. <i>Evolución de SH en el tiempo</i>	29
Figura 7. Grado de daño vs Relación de curación.....	30
Figura 8. SH vs D para la zona de monitoreo 2.....	32
Figura 9. SH vs D para la zona 3.....	33
Figura 10. Índice de curación HR.....	34
Figura 11. Ancho de grieta Probeta B: Punto 1.....	35

RESUMEN

El agrietamiento en el hormigón armado acorta la vida útil de las estructuras al permitir el ingreso de agua, gases o iones salinos que corroen el acero, el hormigón tiene la capacidad natural de sellado de grietas hasta cierto límite, sin embargo, no es suficiente cuando se producen grietas superiores a los 0.3 mm. En esta investigación se estudia la influencia del aditivo cristalino (CA) con fibra natural de abacá en el sellado de grietas en un hormigón de 21 MPa. Vigas de hormigón con CA y fibra fueron fisuradas tras 28 días de curado mediante el ensayo de flexión en 3 puntos, la evolución del sellado de grietas se evaluó mediante la velocidad de pulso utilizando indicadores de grado de daño (D) y relación de curación (SH), y la prueba de autocuración con el indicador de sellado de grietas (HR). Entre los resultados se destacan las probetas con 3% de CA ya que obtuvieron un mejor desempeño en ambas pruebas respecto a las probetas de 2% de CA y las de control. Se encontró que para grados de daño (D) obtenidos de la prueba de ultrasonido menores a 0.10, CA y la fibra no tienen un buen desempeño en el sellado de grietas presumiblemente por la baja disponibilidad de agua.

Palabras claves: aditivo cristalino, fibra natural, velocidad de pulso, sellado de grietas, autocuración.

ABSTRACT

Cracking in reinforced concrete shortens the useful life in the structures to allow enter water, gases, or salt ions that corrode steel; the concrete has the natural crack-sealing ability up to a specific limit; however, it is not sufficient when produced cracks above 0.3 mm. In this research, we study the influence of crystalline additive (CA) and natural abaca fiber in the sealing of cracks in the concrete of 21 MPa. Concrete beams with CA and fiber were cracked after 28 days of cured by 3 point bending test, the progress of crack sealing was evaluated by pulse speed using indicators like damage degree (D) and relationship healing (SH), and the self-healing test with the crack sealing indicator (HR). Among the results stand out the specimens with 3% of CA since they performed better in both tests regarding 2% of CA and the control specimens. It was found that the damage degree (D) obtained from the ultrasound test was less than 0.10, CA and fiber do not perform well in crack sealing, probably because of the low availability of water.

Key words: crystalline additive, natural fiber, pulse speed, crack sealing, self-healing.

Reviewed by:



Firmado electrónicamente por:
EDUARDO SANTIAGO
BARRENO FREIRE

Lic. Eduardo Barreno Freire.

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604936211

CAPÍTULO I. INTRODUCCION

El hormigón es un material frágil que presenta un inevitable agrietamiento provocado por diversas razones, ya sea pérdida de humedad, cambios de temperatura, condiciones de meteorización, prácticas constructivas inadecuadas, sobrecargas. Dichas fracturas pueden permitir el ingreso de agua, iones agresivos o gases que resultan en la corrosión prematura del acero de refuerzo, acortando la vida útil de las estructuras e incrementando los costos de mantenimiento, en Europa el costo asignado para obras de recuperación es la mitad del presupuesto anual de construcción (Caileux & Pollet, 2019).

A pesar de su vulnerabilidad, el concreto es capaz de curar sus grietas por sí mismo hasta cierto punto debido a su capacidad de curación autógena, sin embargo, esta capacidad está limitada al tamaño de fisura, según Suleiman & Nehdi (2018), el límite máximo de fisura que se puede curar mediante ese proceso es de 0,3 mm, además para obtener un sellado completo se requiere de largos periodos de tiempo, alrededor de un año.

Se han explorado diversos mecanismos para mejorar el proceso de curación de grietas en el hormigón, incluyendo el uso de fibras, bacterias, encapsulación química, agentes expansivos, aditivos minerales, todos estos métodos están englobados en el enfoque de curación autónoma del hormigón.

El uso de fibras para mejorar las propiedades del hormigón se viene presentando desde hace ya muchos años, se ha planteado algunas fibras como el acero, vidrio, fibras sintéticas y naturales. Singh & Gupta (2020), en su investigación hicieron uso de la fibra de celulosa como refuerzo y evaluaron su impacto en la curación autógena del hormigón, entre sus resultados se destaca una mejora en dicha propiedad al tener una velocidad de pulso de ultrasonido 48,7% más alta en comparación al hormigón normal después de 21 días de inmersión en agua.

Según Singh & Gupta (2020), la celulosa ofrece 3 mecanismos de sellado de grietas que favorecen al hormigón, dichos mecanismos son: la limitación del ancho de fisuras en la fase de contracción plástica, reducción del agrietamiento en un 85% respecto a un hormigón

normal, además, la celulosa al funcionar como un depósito de agua ayuda a un mejor curado de grietas del hormigón.

Por otra parte, existe un gran interés en investigaciones que incluyen aditivos cristalinos como agente cicatrizante en el hormigón, Roig-Flores et al. (2016), encontraron que los especímenes de hormigón que incorporan mezcla cristalina de 4% por peso del cemento logran una mejor curación de grietas cuando son sumergidas en agua a 30 °C, logrando reparar grietas de hasta 0.30 mm después de 42 días de curación. Cuenca et al. (2018), muestran que el tipo de exposición ambiental es el factor más determinante en la capacidad de curación autónoma del hormigón, los especímenes que incluyen aditivos cristalinos expuestos al aire libre exhiben un bajo sellado de grietas, por otro lado, el sellado completo de la fisura sólo se observa para probetas permanentemente sumergidas en agua y con anchos de fisura inferiores a 0,30 mm, la mejora en la curación por mezclas cristalinas es más relevante en grietas estrechas de hasta 0,15 mm de ancho, cuando se sumerge permanentemente en agua.

Entre las posibles aplicaciones del tema en estudio están las obras hidráulicas, como represas o canales, aplicado a mejorar las propiedades de permeabilidad y durabilidad del hormigón; las estructuras de puentes son otra posible aplicación, donde las grietas se propagan e incrementan debido a la repetitiva aplicación de la carga de servicio y la exposición a ambientes salinos y húmedos.

Este trabajo de investigación presenta como hipótesis que la tasa de curación autónoma de grietas en hormigones reforzados con fibra de celulosa se puede mejorar en el período de curación inicial (8 días) al usar aditivos cristalinos, dicha capacidad es evaluada mediante la cuantificación de dos indicadores, la relación de curación SH obtenidas mediante pruebas de ultrasonido y el sellado de grietas HR determinada mediante el método innovador empleado por los autores (Singh & Gupta, 2020). Los especímenes estudiados son curados bajo inmersión total en agua por un periodo de 28 días previo a la fisuración y 28 días posteriores durante las respectivas evaluaciones. El objetivo es evaluar el potencial de autocuración de un hormigón convencional (21 MPa) que incluye fibra natural y aditivo cristalino.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

Las grietas en las estructuras de hormigón son áreas patológicas que afectan la estética, durabilidad y si el grado de severidad así lo permite, puede afectar a las propiedades estructurales de los miembros de hormigón. Ocurren en cualquier sitio, ya sea muros, vigas, columnas, losas; son varias las causas que las provocan, ya sea por condiciones propias del proceso de endurecimiento, condiciones climáticas, cargas propias de servicio o sobrecargas debido a un deficiente diseño; su clasificación se jerarquiza de acuerdo con su prolongación y penetración en la estructura.

Según Souza (2021), las fisuras tienen un espesor de menos de 0,5 mm, aparecen generalmente en la superficie de la parte estructural, normalmente no implican problemas estructurales, pero puede representar la primera etapa de una fractura, además Doostkami et al. (2021) indica que fisuras hasta este espesor no influyen significativamente en la permeabilidad del hormigón; como tal, una fractura menciona Souza (2021), es una abertura más acentuada y profunda que puede visualizarse, con una ampliación entre 0.5 a 1.5 mm, indica la ruptura del elemento estructural y compromete la integridad de la pieza. Por otro lado, una grieta es una abertura profunda y bien marcada mayor de 1.5 mm, la cual permite el paso de aire y agua al interior del elemento resultando en la corrosión del acero o reacciones químicas no deseadas, por otro lado, Doostkami et al. (2021) afirma que grietas superiores a 0.5 mm hasta 2.0 mm aceleran el proceso de permeabilidad y por tanto de corrosión. Cabe mencionar, que estos conceptos de clasificación de grietas no se los debería considerar como una verdad absoluta para este enfoque de investigación, pues la inspección visual de la superficie de la grieta no expone la realidad interna de la misma y, por tanto, generalizar su naturaleza por visualización sería falso, por ende, la visualización es solo un complemento a pruebas con mayor confianza como el ultrasonido UPV y prueba de autocuración.

La curación de grietas en el hormigón está basada en dos procesos principales: la curación autógena, y la curación autónoma (Cuenca et al., 2018). El enfoque de curación autógena es una propiedad inherente del hormigón en la cual no se requiere añadir materiales específicos a la matriz, se produce espontáneamente mediante 3 mecanismos: por la hidratación del cemento no hidratado, recristalización de portlandita y formación de calcita (Singh & Gupta,

2020). En el concreto joven, la hidratación continua es el mecanismo de curación dominante debido a su contenido relativamente alto de partículas de cemento sin hidratar, mientras que la formación de carbonato de calcio se convierte en el mecanismo principal a una edad posterior (Azarsa et al., 2019).

De Belie et al. (2018), indican que la curación autógena es eficiente para sellar grietas pequeñas por debajo de los 0.3 mm únicamente en presencia de agua. Suleiman & Nehdi (2018), reportan que el ancho máximo de fisura logrando un cierre completo a través de la curación autógena es de hasta 0.30 mm después un año. Bajo inmersión en agua con CO₂ durante 90 días, la curación autógena podría curar grietas de hasta 0.45 mm (Yıldırım et al., 2018).

Por otro lado, la curación autónoma es producida por reacciones de un agente específico incluido intencionalmente en el diseño de la mezcla del concreto (Flores et. al., 2021). Los agentes más utilizados en este enfoque son los polímeros superabsorbentes, aditivos cristalinos, bacterias, uso de fibras, etc.

ACI 212 (2010), clasifica a los aditivos cristalinos como aditivos reductores de la permeabilidad que trabajan en condiciones hidrostáticas (PRAH). Este tipo de aditivo está compuesto por cemento Pórtland, arenas de sílice muy finas y aditivos químicos especiales, tiene un comportamiento altamente hidrofílico, es decir reaccionan con el agua formando precipitados insolubles que rellenan poros y fisuras (Van Tittelboom & De Belie, 2013). Según Cumberbatch (2021), como producto de la reacción de estos aditivos, se forman geles CSH y precipitados formados por calcio y moléculas de agua. De acuerdo con el reporte del ACI-212, el componente de la matriz que reacciona es el silicato tricálcico, aunque otros estudios indican que lo que reacciona es la portlandita (Žižková et al., 2018).

Los aditivos cristalinos mejoran ligeramente la autocuración en términos de cierre de grietas y estanqueidad al agua, son efectivos solo en contacto directo con el agua y para grietas por debajo de 0.30 mm (Roig-Flores et al., 2016). En sus resultados se resalta que la mejor condición de exposición curativa es la inmersión en agua a 30 °C con la mezcla cristalina al 4% del peso del cemento. Bajo esta exposición, los especímenes lograron una relación de

sellado de grieta (HR) promedio igual a 0.99 con la desviación estándar más pequeña y un HR de 0.98 para grietas de hasta 0.40 mm después de 42 días de curación.

Azarsa et al. (2019), muestran que un hormigón elaborado con cemento portland y aditivos cristalinos al 2% por peso del cemento alcanza un sellado de grietas (HR) en promedio de 1 en anchos superficiales de grieta alrededor de 0.25 mm en aproximadamente 4 días de prueba, además se registró un aumento de la resistencia a la compresión de un 11% respecto al hormigón sin aditivos, los autores explican que esto se debe a que el aditivo cristalino rellena los vacíos y funciona como un activador de la hidratación del cemento. De igual manera, Azarsa et al. (2021), en su investigación con aditivo cristalino al 2% del peso del cemento encontraron una relación de sellado completa en dos probetas a los 20 días de curado en grietas de 0.36 mm en promedio, esto lo atribuyeron probablemente a la deposición de cristales adicionales en la grieta que actúa como una barrera física.

La liberación controlada de agua dentro del hormigón es un enfoque estudiado por varios autores, en la investigación de Singh & Gupta (2020), se ha empleado materiales absorbentes como la fibra de celulosa. La fibra vegetal está compuesta de una gran cantidad de celulosa que puede almacenar el agua en su interior y liberarla de forma controlada cuando aparece una grieta, el principal beneficio de estos sistemas es un aumento en la velocidad de autocuración en comparación con la curación autógena (Cuenca et al., 2018).

En investigaciones a nivel nacional; Sierra Beltran et al. (2017), estudiaron la capacidad de autocuración de un hormigón reforzado con fibras de abacá y bacterias, los resultados mostraron que después de 42 días se lograron reparar grietas de hasta 0.125 mm, en este artículo se demuestra que la fibra de abacá aporta a la curación de grietas del hormigón, sin embargo, gran parte de estos resultados también se debe a la incorporación de bacterias, ya que éstas son las que producen minerales compatibles con el hormigón en las grietas. El cultivo de bacterias puede resultar en un método no muy aplicable para nuestro medio debido a que su producción es limitada, además que su activación dentro de la matriz resulta complicada y costosa, lo cual limita su aplicación en estructuras de hormigón.

Zhong & Yao (2008), en su investigación con cenizas volantes en un hormigón normal con superplastificante fisuró probetas cúbicas 100x100x100 mm, tras 28 días de curado inicial y

con un curado posterior de 30 días obtuvo una relación de dependencia entre la relación de curación (SH) y el grado de daño; para grados entre 0.20 y 0.45 se obtuvo valores de SH de 0.25 a 0.55 respectivamente con un crecimiento directamente proporcional entre ambas variables dentro de ese rango. Además, evaluó la influencia de la edad de fisuración en el SH y obtuvo que a menor edad se obtienen SH superiores, esto debido a que en un concreto joven existe mayor disposición de partículas de cemento sin hidratar que contribuyen a la reparación de grietas.

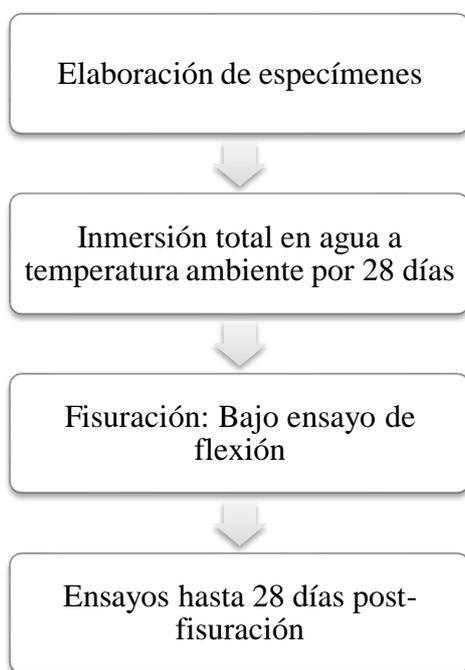
En el caso de estructuras donde la durabilidad es un factor clave, tales como túneles o estructuras contenedoras de líquidos, el diseño está fuertemente influenciado por la condición de control de grietas a través de la distribución adecuada del acero de refuerzo en la zona de máxima tensión en el hormigón, esta condición representa un sobrecoste en la estructura e incluso podría representar una dificultad constructiva adicional, por lo que esta sería una oportunidad para implementar un hormigón autocurable que garantice la durabilidad.

Existen procedimientos para reparar grietas en el hormigón de forma superficial, según ACI (2017), se tiene la inclusión de inyecciones de resina epoxi, la técnica de perfilado y sellado, costuras de fisuras con elementos de acero y mortero, llenado por gravedad con monómeros o resinas de baja viscosidad, entre otros. Sin embargo, esta tarea no siempre es realista debido a la aparición de grietas en lugares incómodos o de difícil acceso, estos tratamientos superficiales son reparaciones o parches que no forman parte integral de la matriz del hormigón, por ende, no mejoran ninguna propiedad mecánica o física, además están restringidos a anchos de grieta determinados, es decir que no son aplicables de manera general; de aquí resalta la importancia del desarrollo de nuevos materiales que puedan reducir la tasa de deterioro, disminuir las demandas de reparación, minimizar los costos y, finalmente, prolongar la vida útil final. Adicionalmente, un hormigón autorreparable permite la reparación de grietas sin intervención humana externa para estructuras inaccesibles, mejorando la capacidad de servicio estructural y la sostenibilidad

CAPÍTULO III. METODOLOGIA

La investigación está orientada a evaluar la capacidad de autocuración de grietas en un hormigón que incluye aditivo cristalino (CA) y fibra natural como agentes promotores de curación de grietas, se establecieron 2 formas de medición: prueba de ultrasonido (UPV), y prueba de autocuración.

Figura 1. *Etapas principales de investigación*



Se trata de un estudio cuantitativo desarrollado en condiciones experimentales, el cual sigue el proceso descrito en la Figura 1. Se elaboraron un total de 28 probetas prismáticas de $15 \times 15 \times 55 \text{ cm}^3$ usando una mezcladora de tambor y siguiendo las especificaciones de la norma NTE INEN 3124 (2017). La relación agua/cemento de todas las mezclas es de 0.56, con una resistencia objetivo del hormigón de control de 21 MPa, la dosificación se tomó de Guaño & Martínez (2017), la cual se muestra en la *Tabla 1*.

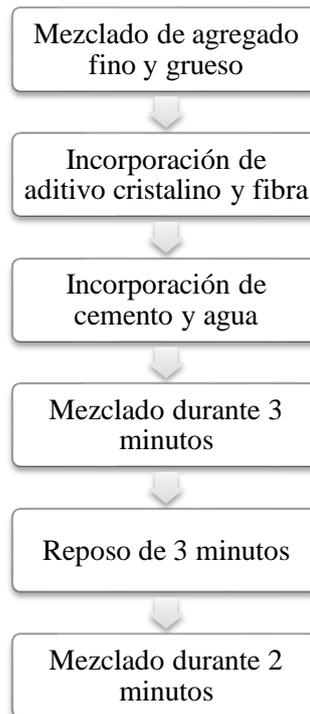
Tabla 1. *Dosificación hormigón de control*

Material	Cantidad	Unidades
Cemento	354.89	Kg/m ³
Agregado grueso	1163.17	
Agregado fino	668.66	
Agua	213.28	

1. Elaboración y curado de las probetas

Se elaboraron 4 probetas prismáticas por cada dosificación de CA y fibra natural, CA fue dosificado en porcentaje del peso de cemento y la fibra natural en porcentaje del volumen total de mezcla. El proceso de mezclado se encuentra detallado en la *Figura 2*.

Figura 2. Proceso de mezclado de materiales



Para esta investigación se usó fibra de abacá debido a su disponibilidad de compra y su alto contenido de celulosa que según Pardo (2015) puede llegar a ser hasta 63.2 %.

La *Tabla 2* muestra el detalle de la cantidad de probetas y la dosificación de CA y fibra para cada una de ellas. Las probetas están clasificadas en dos grupos definidos por la cantidad de aditivo, en el grupo 1: las probetas A, B y C con 3% de aditivo y con cantidades de fibra desde 0.25 hasta 0.75% con variaciones de 0.25%. El grupo 2 tiene las mismas variaciones respecto a la cantidad de fibra, pero con 2% de aditivo. El grupo 3 corresponde a las probetas de control.

Tabla 2. Dosificaciones de CA y fibra natural (abacá)

N° grupo	Nomenclatura de probeta	Número de probetas	Aditivo cristalino (%)	Fibra natural (%)
1	A	4	3	0.25
	B	4		0.50
	C	4		0.75
2	D	4	2	0.25
	E	4		0.50
	F	4		0.75
3	Control	4	0	0

Se usó 3 especímenes por cada dosificación para realizar la prueba de ultrasonido bajo la norma ASTM C 597-09, 2010 y 1 espécimen por cada dosificación para evaluar la autocuración bajo la prueba patentada empleada por los autores (Singh & Gupta, 2020), en estos últimos fue necesario la extracción de núcleos (ϕ 7.5cm, h 7.5cm) luego del agrietamiento.

2. Resistencia a la compresión del hormigón de control

Según NEC SE-HM (2015), el valor mínimo para un hormigón normal es de 21MPa, justificando así la dosificación empleada. La resistencia a la compresión se evaluó en 2 cilindros de hormigón de 30 x15cm a los 7 días de curado, estimando que a esta edad se tendría un 65% de la resistencia final a los 28 días (Valcuate et al., 2009).

3. Fisuración de especímenes

Transcurridos 28 días después de la elaboración de las probetas, las muestras fueron agrietadas mediante el ensayo a flexión, norma NTE INEN 2554 (2011). La carga máxima aplicada fue inferior a la carga de rotura, de manera que únicamente se presente agrietamiento superficial y no la falla total de la probeta. Para ello se empleó la máquina universal Shimadzu que cuenta con un sensor que detecta la primera fisura y detiene el ensayo.

4. Prueba de ultrasonido (Velocidad de pulso)

Con el fin de evaluar la condición interna de las vigas y su evolución en el tiempo se emplea el equipo de ultrasonido, con el cual es posible identificar discontinuidades en la matriz del hormigón, mostrando como resultado el tiempo de viaje de la onda y su velocidad, la cual

disminuye al identificar dichas discontinuidades. Se registró el tiempo que le toma a la onda atravesar perpendicularmente a la grieta, la velocidad de onda a través del hormigón está definida por la $Ec (1)$.

$$V = \frac{D}{T}$$

Ec (1)

Donde V es la velocidad de onda, “D” es la medida longitudinal de la probeta [m] y “T” es el tiempo requerido para recorrer la distancia “D”.

La prueba UPV se realizó en las probetas prismáticas sin fisurar y agrietadas a la edad de 28 días, seguidos por 28 días de monitoreo de la grieta. El dispositivo de ultrasonido consta de dos transductores uno para transmitir la onda ultrasónica y el otro para recibirla, ambos transductores se conectan con la superficie de la viga el tiempo necesario para que la onda recorra de manera perpendicular a la dirección de la grieta (a través de la grieta). La norma recomienda colocar un gel de acoplamiento en la superficie, para obtener una mejor área de contacto y resultados precisos, además, los autores sugieren, que el ensayo se realice a una frecuencia de 150 kHz.

Resulta complicado caracterizar las probetas en base al ancho de fisura debido a que las grietas inducidas por el ensayo a flexión tienen diferentes anchos en toda su longitud, para poder comparar los resultados, se ha introducido el indicador de grado de daño definido por la $Ec (2)$.

$$D = 1 - \frac{V_p}{V_0}$$

Ec (2)

Donde D es el grado de daño de la probeta, V_p es la velocidad de onda de la probeta fisurada y V_0 es la velocidad de onda de la probeta no fisurada.

Se espera que la velocidad de onda en las probetas fisuradas se reduzca significativamente en comparación a la velocidad de la muestra no fisurada, esto debido a un aumento considerable de fisuras en la matriz del hormigón. Así mismo, debido a la reacción de CA,

se forman precipitados formados por calcio los cuales rellenan la grieta internamente conduciendo a un aumento en la velocidad de onda.

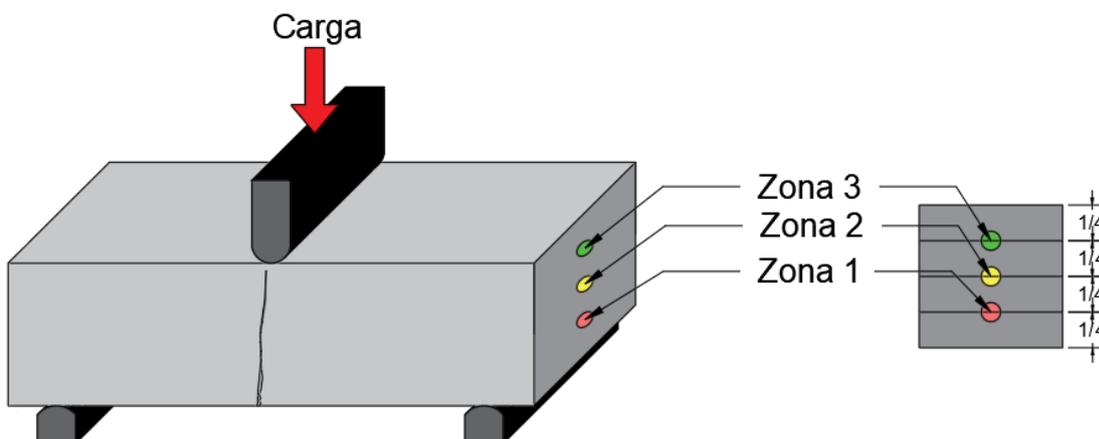
Para cuantificar la curación de grietas en el hormigón se usó un indicador de autocuración SH, el cual está definido por la Ec (3).

$$SH = \frac{V_{i+1} - V_p}{V_p} \quad \text{Ec (3)}$$

Donde SH es la relación de curación, V_{i+1} es la velocidad de onda al día i después de la fisuración, y V_p es la velocidad de onda de la muestra fisurada.

Tomando en cuenta la distribución de esfuerzos en la viga al momento del ensayo y para categorizar los resultados, se divide la sección transversal de la viga cada $\frac{1}{4}$ de distancia obteniendo 3 puntos de monitoreo, que se consideran convenientes para obtener datos cercanos a la máxima, mínima tensión y una transición entre ellos, tal como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En cada punto se registró 2 veces la velocidad de onda de ultrasonido de forma perpendicular a la dirección de la grieta.

Figura 3. Puntos de monitoreo de velocidad de ultrasonido



5. Prueba de autocuración

La prueba de autocuración fue desarrollada en base a lo expresado por Singh & Gupta (2020), las grietas fueron inducidas en las probetas prismáticas mediante el ensayo de flexión, posteriormente se extrajo un núcleo en las probetas fisuradas de tal forma que se obtenga como resultado un cilindro de $\varnothing 7.5 \times 7.5$ cm. En la extracción del núcleo se procuró capturar la mayor parte de la grieta, pero no la total, esto con el fin de que la probeta no se fracture con la vibración de la extracción.

En la sección transversal del cilindro se instala un tubo contenedor de líquido de una altura de 1.7 m, y se lo adhiere al cilindro mediante teflón y silicón, se procura que no exista fugas de agua en dicha unión. Además, con el mismo material, se rellena las grietas longitudinales del cilindro para evitar la pérdida de agua.

El proceso consiste en cuantificar la cantidad de líquido que atraviesa el cilindro y que es recogida en el recipiente recolector, con el objetivo de establecer si la curación de grietas ayuda a evitar el flujo de agua a través de la grieta del hormigón, a su vez, esta prueba permite evaluar la hipótesis de la investigación y corroborar los resultados obtenidos en la prueba de ultrasonido. Mediante la $Ec (4)$ se cuantifica la relación de sellado de grietas.

$$HR = 1 - \frac{q_F}{q_0}$$

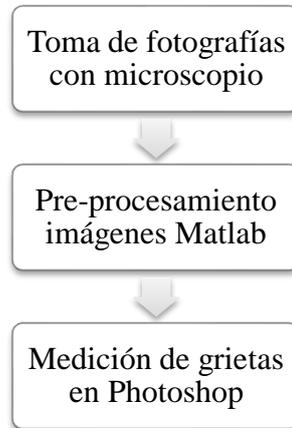
Ec (4)

Donde HR es la relación de sellado de grietas, q_F es el flujo final de agua en lt/min y q_0 es el flujo inicial de agua en lt/min.

6. Medición de ancho de grietas

La medición de grietas es un complemento a la prueba de autocuración, se la realiza con el objetivo de relacionar el flujo de agua que atraviesa por la grieta con el ancho respectivo, el proceso se encuentra descrito en la Figura 4.

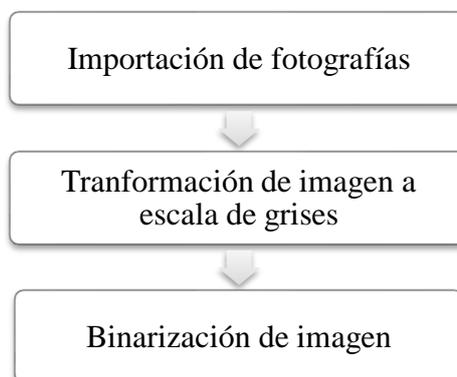
Figura 4. *Proceso de análisis de imágenes*



Las fotografías fueron tomadas con un estereomicroscopio serie 200, con un aumento de 2x, se fotografiaron ambas caras del cilindro usado para la prueba de autocuración, en total se registró 6 puntos, 3 por cada cara en intervalos equidistantes.

Las fotografías tomadas se cargaron al software Matlab para realizar el procesamiento de imágenes mediante funciones predeterminadas, el cual consiste en los pasos descritos en la Figura 5. Este proceso se realiza con el fin de reducir el error en las mediciones del ancho de grieta superficial. Después del procesamiento, los anchos de grieta fueron medidos en el software Photoshop usando una escala de medida personalizada.

Figura 5. *Algoritmo de procesamiento de imágenes*



CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Resistencia a la compresión en el hormigón de control

La resistencia a la compresión del hormigón de control fue evaluada a los 7 días de curado, los resultados se muestran en la Tabla 3. La resistencia a la compresión a los 28 días fue estimada mediante lo indicado por Valcuate et al. (2009).

Tabla 3. Resistencia a la compresión hormigón de control

N°	Carga [kN]	Resistencia a la compresión 7 días [MPa]	Resistencia a la compresión estimada 28 días [MPa]
1	313.2	17.22	23.24
2	337.1	18.48	24.94
Promedio	325.15	17.85	24.09

Se puede notar que a los 28 días la resistencia estimada es ligeramente mayor a la esperada de 21 MPa.

2. Velocidad de pulso

En la Tabla 4 se muestran los resultados del monitoreo de ultrasonido clasificados de acuerdo a la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra la velocidad de pulso en las probetas sin fisurar tras 28 días de curado inicial, después del agrietamiento, y la velocidad recuperada tras 28 días de inmersión en agua, también se indica el grado de daño calculado mediante la $E_c (2)$ y su respectiva relación de curación SH obtenida a partir de la $E_c (3)$.

Tabla 4. Velocidades de onda - Zona 1

Dosificación	Especimen	Velocidad de pulso (km/s)			Grado de daño (D)	Relación de curación (SH)
		Sin fisurar	Fisurado	28 días		
A	A1	4.19 ± 0.01	2.86 ± 0.06	3.97 ± 0.00	0.32	0.39
	A2	4.15 ± 0.00	2.85 ± 0.00	4.12 ± 0.00	0.31	0.45
	A3	4.05 ± 0.03	3.01 ± 0.00	4.11 ± 0.02	0.26	0.37
B	B1	4.22 ± 0.00	3.58 ± 0.02	4.62 ± 0.01	0.15	0.29
	B2	4.23 ± 0.00	3.33 ± 0.00	4.22 ± 0.00	0.21	0.27
	B3	4.00 ± 0.00	2.77 ± 0.01	3.76 ± 0.00	0.31	0.36
C	C1	4.34 ± 0.01	3.41 ± 0.00	3.93 ± 0.00	0.22	0.15
	C2	4.24 ± 0.01	3.12 ± 0.00	4.06 ± 0.00	0.26	0.30

	C3	4.07 ± 0.00	3.14 ± 0.00	3.62 ± 0.00	0.23	0.15
D	D1	4.25 ± 0.00	3.55 ± 0.00	3.81 ± 0.00	0.16	0.07
	D2	4.25 ± 0.01	3.53 ± 0.01	3.65 ± 0.01	0.17	0.03
	D3	4.24 ± 0.00	3.55 ± 0.01	3.72 ± 0.00	0.16	0.05
	E1	4.28 ± 0.00	3.57 ± 0.01	4.21 ± 0.01	0.16	0.18
E	E2	4.26 ± 0.01	2.92 ± 0.00	3.35 ± 0.00	0.32	0.15
	E3	4.08 ± 0.01	2.82 ± 0.00	3.30 ± 0.00	0.31	0.17
	F1	4.25 ± 0.00	3.47 ± 0.01	3.72 ± 0.01	0.18	0.07
F	F2	4.25 ± 0.00	3.74 ± 0.00	3.93 ± 0.01	0.12	0.05
	F3	4.09 ± 0.00	2.83 ± 0.00	3.11 ± 0.02	0.31	0.01
	Control	Control 1	4.30 ± 0.00	3.63 ± 0.00	3.86 ± 0.00	0.16
Control 3		4.06 ± 0.00	3.47 ± 0.01	3.74 ± 0.02	0.14	0.08

En la Tabla 4, la velocidad de pulso en el hormigón sin fisurar que incluye fibra y aditivo no difiere significativamente respecto al hormigón de control, en todos los casos se obtuvo valores superiores a los 4000 m/s. La velocidad de pulso de los especímenes sin fisurar es un indicador de la calidad del hormigón, en base a la clasificación propuesta por Solís Carcaño et al. (2004), el hormigón es de buena calidad. La fisuración disminuye considerablemente la velocidad de pulso, lo cual indica la presencia de la grieta en el hormigón, el tiempo de curado después de la fisuración da un aumento en la velocidad de pulso incluso para el hormigón de control, esto se debe al proceso de curación autógena. En el Figura 6 se presenta la evolución de SH en el tiempo para cada una de las probetas ensayadas.

Figura 6. Evolución de SH en el tiempo

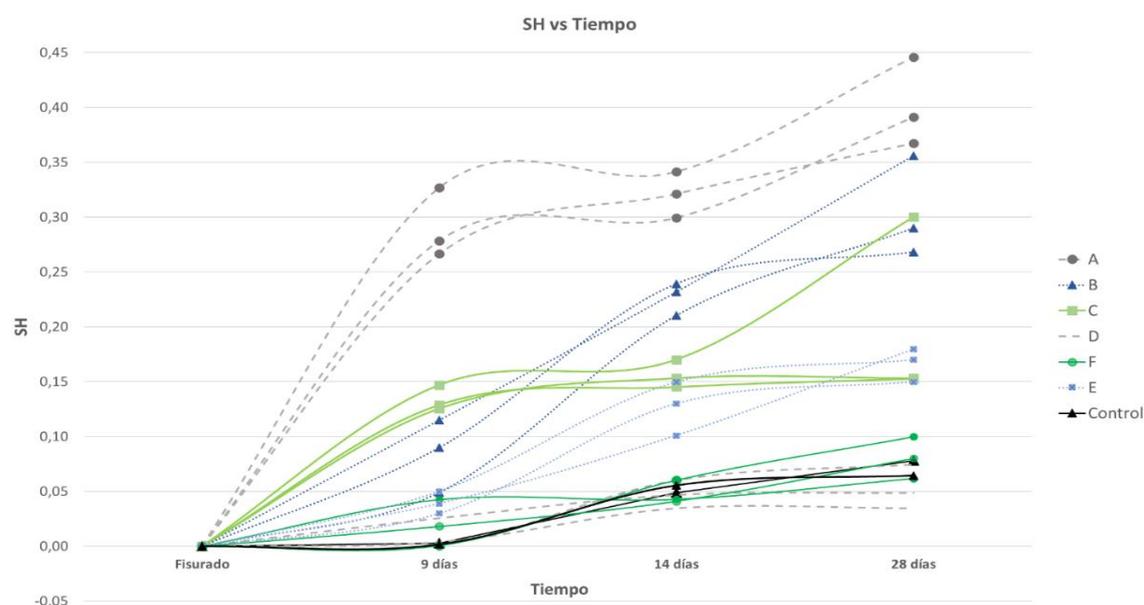
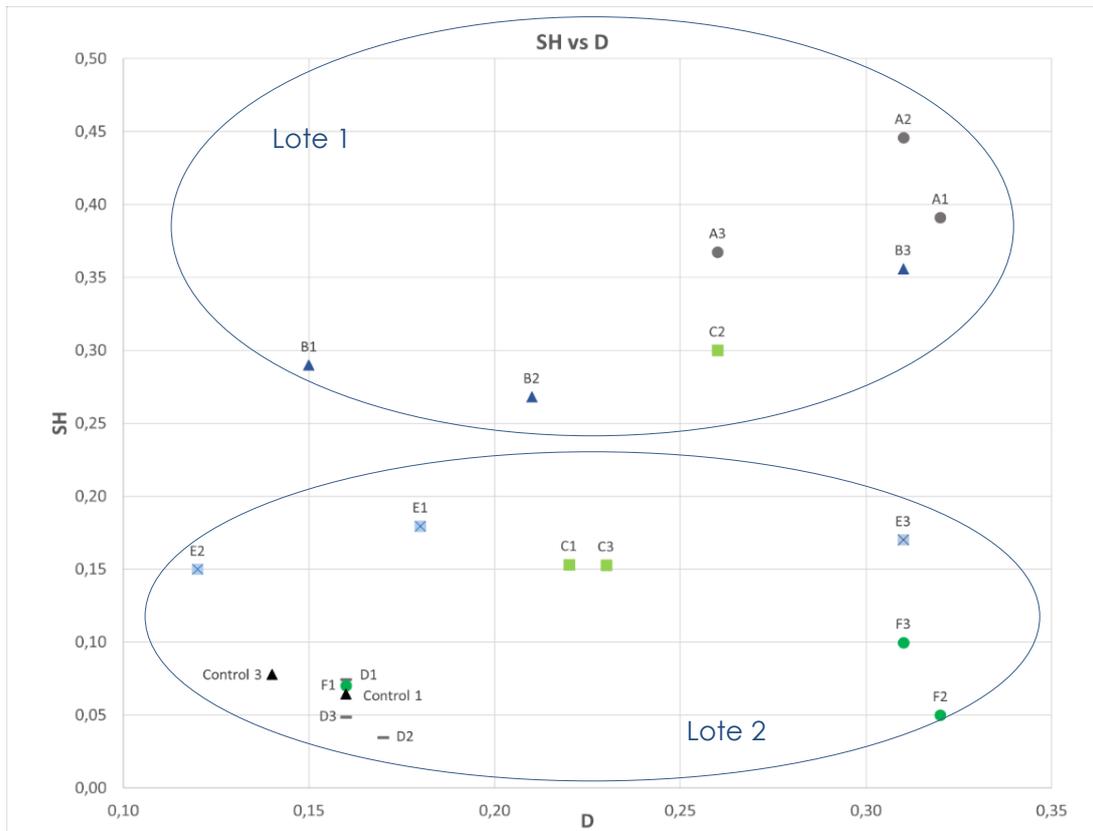


Figura 7. Grado de daño vs Relación de curación



En la Figura 6 es posible notar que los especímenes de hormigón con un contenido del 3% de aditivo cristalino (A, B, C) obtuvieron una mayor recuperación de velocidad de onda en comparación con aquellos del 2% de aditivo (D, E, F) y el hormigón de control. Sin embargo, es necesario contrastar esta idea preliminar con la Figura 7 donde se relaciona el grado de daño (D) vs SH; intuitivamente se esperaba que aquellas probetas con un D menor alcancen un SH mayor, debido a que los cristales deben rellenar un volumen menor de grieta, contrario a esto, en la investigación de Singh & Gupta (2020), se indica que SH es directamente proporcional a D, esto debido a que cuanto mayor es D, mayor cantidad de agua ingresa a la matriz del hormigón, facilitando la reacción del aditivo. Basados en los datos obtenidos, y según el análisis de correlación por lotes efectuado en el software R, se determinó que existe una correlación alta entre D y SH ($r=0,78$ y $p<0,05$) para el lote 1, con esto se entiende que, a mayor D corresponde mayor SH, lo que confirma lo expresado por Singh & Gupta (2020).

Esto se cumple siempre y cuando exista la cantidad suficiente de productos de cristalización dentro de la matriz de hormigón, parece ser que la cantidad de 3% de aditivo si ayuda a un

mejor sellado de grietas, sin embargo, no se ha obtenido un sellado completo en ningún punto de monitoreo.

En cuanto al lote 2 se obtuvo un ($r=.18$ y $p>.05$), en este grupo se encuentran las probetas con 2% de aditivo y las de control, en este caso sin importar que aumente D, SH no mejora, se asume que es debido a la insuficiente cantidad de aditivo que cristalice en la matriz, las probetas con 2% de aditivo no mejoran el sellado de grietas respecto a las del hormigón normal.

A partir de la Figura 7 y observando el comportamiento de las probetas con un D alrededor de 0.3; A2 con 3% de aditivo, respecto a la probeta E3 con 2% de aditivo, la probeta A2 obtiene una recuperación 2.65 veces más grande en igual tiempo (28 días), las curvas de la Figura 6 confirman esta afirmación. Por otra parte, Zhong & Yao (2008), en un hormigón convencional tras un curado de 30 días después de la fisuración, obtuvieron un SH de 0.40 para un D de 0.3, similar a las probetas A, esta comparación sugiere nuevas investigaciones con uso de cenizas volantes disponibles en el medio aplicadas en términos de curación autónoma del hormigón.

Se puede observar que para un grado de daño de alrededor de 0.15 las probetas con un 3% de aditivo cristalino también son mejores que aquellas con un 2% de aditivo y las de control, éstas tienen un SH alrededor de 4 veces más alto que la probeta de control y la del 2% de CA.

La variación del contenido de fibra de abacá no parece tener mayor incidencia en la curación de grietas, en las probetas con 3% de aditivo, aquellas con menor volumen de fibra (0.25 %) exhiben un mejor SH, por el contrario, en los especímenes con 2% de aditivo esta tendencia no se corrobora. Esto fue confirmado mediante la prueba H de Kruskal-Wallis, donde se determinó que las medianas de SH no difieren significativamente entre los distintos grupos $\chi^2(2, N=9) = 6.06$, $p > 0.05$, por tanto, la variación del contenido de fibra no incide en el grado de curación para cualquier contenido de aditivo cristalino. Sin embargo, los resultados indican que el límite máximo de fibra es de 0.5%, porcentajes mayores a este valor perjudican el desempeño del hormigón para curar sus grietas, como es el caso de las probetas C. Se asume que la fibra en cantidad excesiva obstruye la formación de cristales que cierren

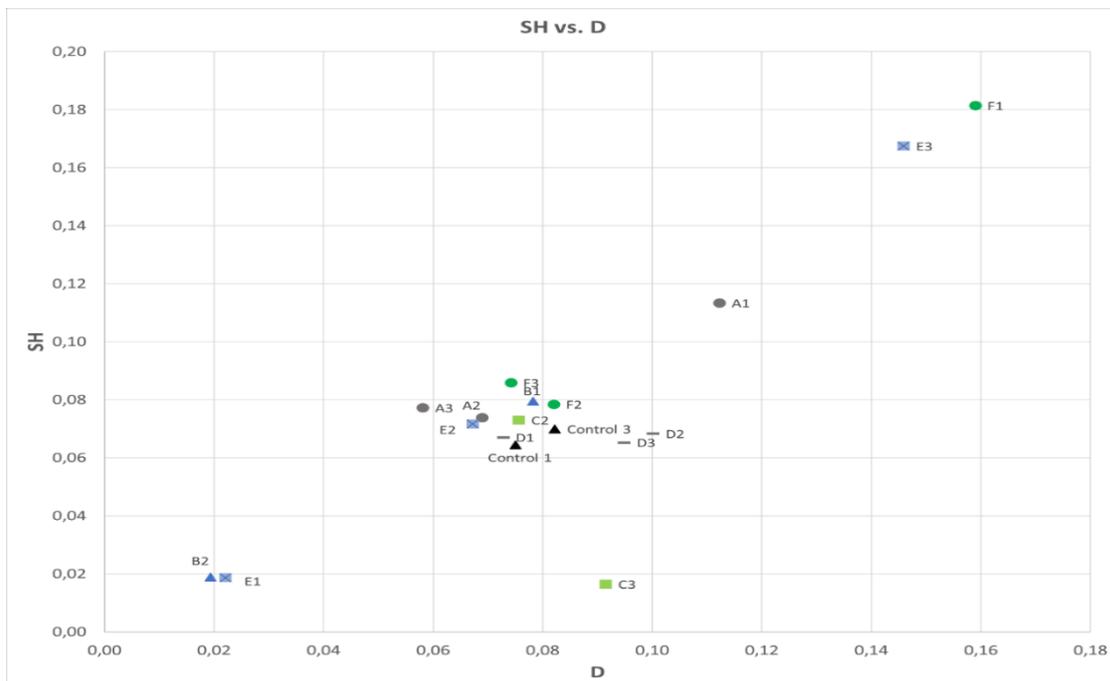
la grieta. Estas afirmaciones resultan válidas específicamente para estas probetas, no como un caso generalizado, pues es necesario una mayor cantidad de datos y diferentes saltos de dosificaciones de fibra para generalizarla.

Respecto a la incidencia del contenido de aditivo cristalino la prueba H de Kruskal-Wallis evidenció que las medias de la SH difieren significativamente $\chi^2(1, N=18) = 17.12, p < 0.05$, es decir, que el grado de curación varía respecto al contenido de aditivo cristalino y resultó en la variable de mayor incidencia respecto al grado de curación.

La velocidad onda del hormigón con celulosa obtenida por Singh & Gupta (2020), fue 0.48 veces más alta respecto al hormigón normal a los 21 días de curado después de la fisuración, mientras que en esta investigación la velocidad de onda fue 0.19 veces más alta respecto a la de control, esto se asume que se debió a que los autores obtuvieron mayores grados de daño y por tanto tasas de curación mayores, se sugiere que para realizar un contraste se debería causar grados de daño similares a los autores para evaluar la incidencia del CA en la autocuración.

La Figura 8 representa la relación entre D y SH para todas las probetas en la zona de monitoreo 2, se omitió la representación de la evolución de SH en el tiempo debido SH no cambió significativamente entre las distintas probetas y por tanto las curvas son similares.

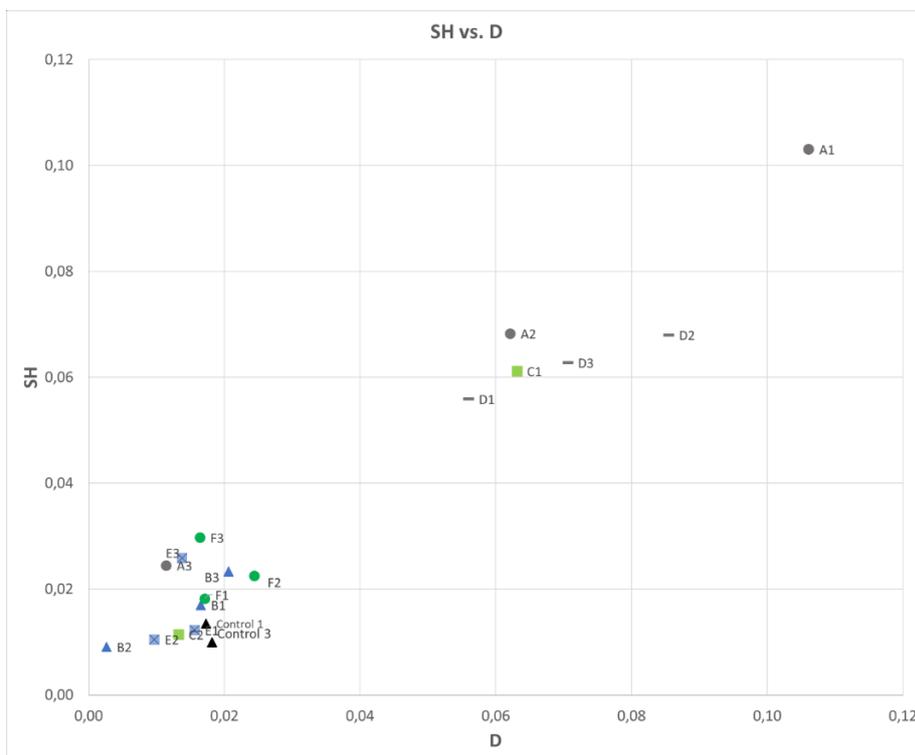
Figura 8. SH vs D para la zona de monitoreo 2



Como se puede evidenciar en la Figura 8 no se observa mayor influencia del contenido de aditivo cristalino o de la fibra para lograr un mayor SH, sin embargo, por la disposición de la mayoría de los datos se podría suponer cierta influencia de estas variables para obtener un grado de recuperación ligeramente superior a la muestra de control. No se aprecia un aporte significativo del grado de daño respecto a SH, pues la mayoría de los datos, sin importar el contenido de fibra o CA o la ausencia de ellos, que se ubican en grados de daño en el rango de [0.06 – 0.10] logran valores de SH alrededor del 8%; en contraste, para grados superiores a 0.10 se muestra una tendencia de subida para SH con el incremento de D, comportamiento que se afirma con la Figura 7 de la zona 1 para contenidos del 3% de CA.

La Figura 9 representa la relación entre SH y D en la zona de monitoreo 3, el comportamiento es similar al observado en la zona 2, por lo cual también se omite la representación de SH en el tiempo.

Figura 9. SH vs D para la zona 3



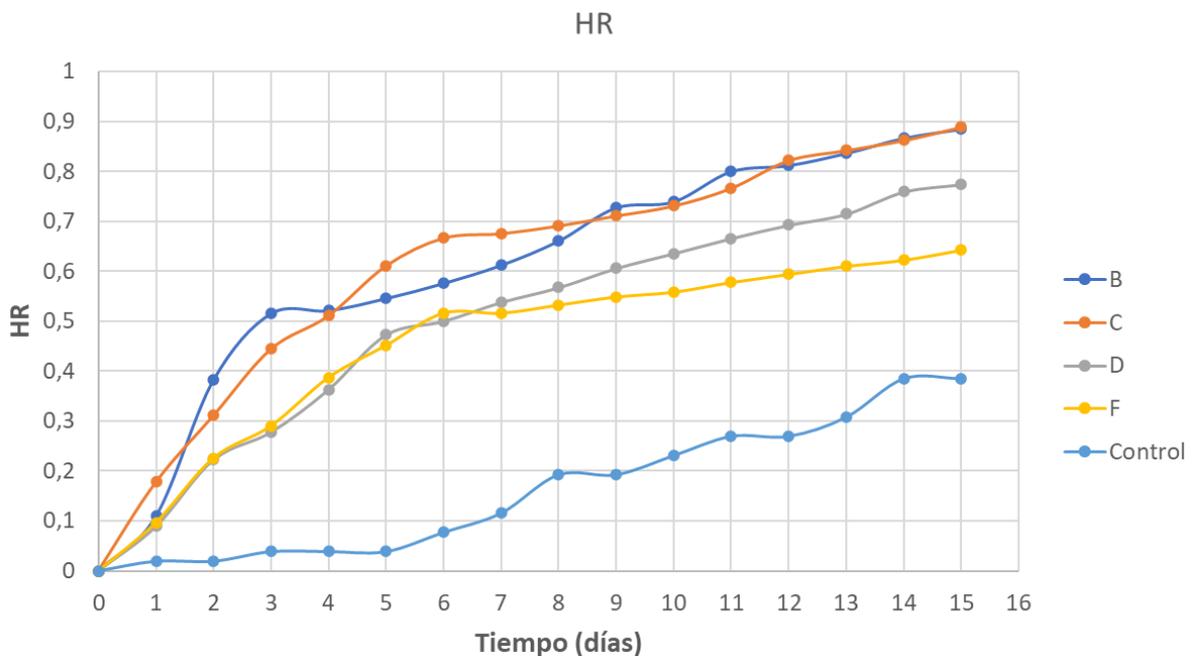
Observando las figuras 8 y 9, es posible determinar que existe un umbral de daño a partir del cual valores de D inferiores no exhiben recuperación o su recuperación es muy baja, esto indicaría que la hidratación de CA en esos puntos de monitoreo no es lo suficientemente buena, ya que no se están produciendo cristales que sellen la grieta, esto indicaría una

limitación del enfoque de investigación, ya que la fibra y el aditivo no son efectivos cuando el grado de daño es inferior de 0.10; se necesita de otros materiales de alta absorción de agua que ayuden a una mejor hidratación de CA y solucionen este inconveniente.

3. Prueba de autocuración

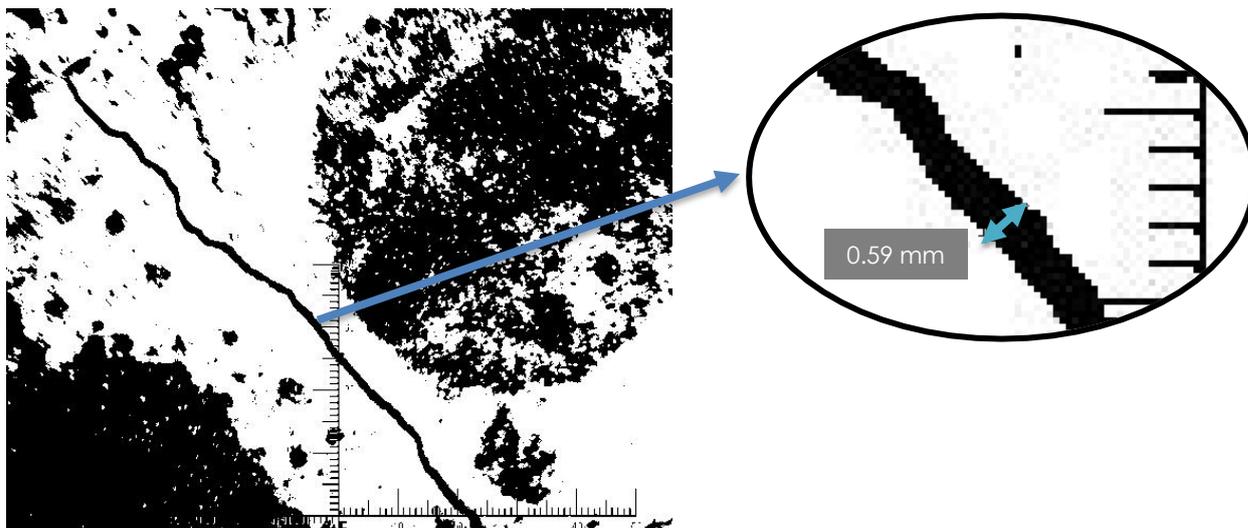
En la Figura 8, se nota una marcada diferencia entre el índice de curación del hormigón que contiene aditivo cristalino y fibra respecto al hormigón de control, en esta prueba, los resultados están influenciados por el ancho de grieta de cada probeta, los cuales están expresados en la Tabla 5. El contenido de minerales en el agua empleada es un factor importante, ya que estos pueden rellenar la grieta junto con los cristales de carbonato de calcio producidos por el aditivo cristalino, lo cual incrementaría el índice de curación, cuando en realidad son ligeramente menores. Las probetas A y E presentaron inconvenientes durante la ejecución del ensayo, en estos especímenes el flujo de agua no logró atravesar el cuerpo de los especímenes, se presume que la grieta no conecta la cara superior con la cara inferior del núcleo o una posible obstrucción de cristales adicionales que taparon la grieta de manera acelerada, por estas razones dichos especímenes fueron desechados.

Figura 10. Índice de curación HR



La figura 11 ilustra el procedimiento de medición de grietas usando una escala personalizada en el software Photoshop.

Figura 11. Ancho de grieta Probeta B: Punto 1



El resumen de los anchos de grieta se muestra en la tabla 5, donde se promedió el ancho de grieta para cada una de las caras de las probetas y un promedio general por cada muestra.

Tabla 5. Ancho de grieta promediado para cada espécimen

	ARRIBA				ABAJO				Promedio General [mm]
	Punto [mm]			Promedio [mm]	Punto [mm]			Promedio [mm]	
	1	2	3		1	2	3		
A	0.30	0.95	0.49	0.58	0.36	0.40	0.39	0.38	0.48
B	0.59	0.94	1.12	0.88	-	-	-	-	0.88
C	1.02	0.91	0.85	0.93	0.87	0.64	0.71	0.74	0.84
D	0.84	1.04	0.92	0.93	0.85	0.86	0.91	0.87	0.90
E	0.65	0.51	0.25	0.47	1.01	0.74	0.25	0.67	0.57
F	1.24	1.29	1.49	1.34	0.70	0.51	0.69	0.63	0.99
Control	1.76	0.51	0.65	0.97	0.95	0.83	1.04	0.94	0.96

Los resultados de la prueba de autocuración son similares a los obtenidos en la prueba de ultrasonido, las probetas B y C (3% de aditivo) obtuvieron el mayor porcentaje de cierre de grietas, alrededor de 0.89, con relación a las probetas D y F (2% aditivo) que obtuvieron porcentajes de curación de 0.77 y 0.64 respectivamente en un periodo de 15 días. Las probetas que incluyen aditivo y fibra muestran una mejor relación de cierre de grietas en comparación con la muestra de control. Es importante considerar que el ancho de grieta influye en el HR, pues mientras aumenta el ancho de grieta que debe ser regenerado

disminuye el HR, esto se evidencia al comparar la probeta D con un ancho superficial promedio de 0.90 y un HR de 0.77 respecto a la probeta F con un ancho de grieta de 0.99, y un HR menor de 0.64, ambas con 2% de CA.

Singh & Gupta (2020), obtuvieron un HR de alrededor de 0.5 a los 15 días con un hormigón que incorpora fibras de celulosa para un ancho de grieta superficial de 0.703 mm, en esta investigación se ha obtenido un HR de 0.88 para un ancho de grieta superficial ligeramente mayor (0.88 mm) en el mismo periodo de tiempo, corroborando de esta manera la hipótesis de investigación. Se presume que la fibra aporta en el sellado de grietas, esto debido a que, al usar un porcentaje de aditivo menor (3%) al usado por Roig-Flores et al. (2016) 4%, se obtuvo una relación de sellado HR similar para un ancho de grieta superior en una menor cantidad de tiempo. Roig-Flores et al. (2016), señalan que los resultados con 4% de aditivo son similares a los obtenidos con 2% de aditivo, esto quiere decir que no hay mejora significativa aumentando la cantidad de aditivo únicamente, una solución a esto puede ser añadir fibra al hormigón, ya que aumenta la disponibilidad de agua dentro de la matriz del hormigón, favoreciendo la reacción del aditivo cristalino. Es necesario recalcar que no se ha conseguido un sellado del 100% de grieta en el periodo de estudio, y tampoco se puede asegurar que la grieta se encuentre sellada en toda su profundidad, a pesar de ello, los resultados indican un sellado de grietas superior al 70%, según Ferrara et al. (2014), es necesario un cierre de fisura superior al 70-80% para iniciar la recuperación de la rigidez y la capacidad de carga. Para corroborar estos resultados se sugiere investigaciones en las que se evalúe la recuperación de rigidez.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES

4. Conclusiones

- La relación de curación SH para las probetas analizadas se ve principalmente influenciada por el contenido de aditivo cristalino CA más que por la cantidad de fibra, esto de acuerdo a la prueba H de Kruskal Wallis; se encontró un mejor desempeño con una adición del 3% de CA obteniendo un SH más alto que el hormigón de control.
- La relación de curación SH en probetas con un grado de daño inferior a 0.10 es muy baja en relación con los demás D, se asume que esto es una consecuencia de la baja hidratación del aditivo cristalino en esa región, se requiere de otros enfoques que ayuden a mejorar este inconveniente, uno de ellos puede ser polímeros superabsorbentes.
- La relación de cierre de grietas HR en el hormigón que incluye aditivo y fibra fue superior a la obtenida en un hormigón con celulosa, confirmando así la hipótesis de investigación, el aditivo cristalino ayuda a mejorar la tasa de curación de grietas en el periodo inicial de curado (8 días), alcanzando un HR de alrededor 0.7.
- Los resultados de ambas pruebas apuntan a que las probetas con 3% de aditivo obtuvieron el mejor sellado de fisuras, sin embargo, en ningún caso se obtuvo un sellado completo de grieta.
- Un aumento en la cantidad de aditivo cristalino no necesariamente implicaría una mejora en términos de sellado de fisuras, el aspecto que merece más atención es el procedimiento para hidratar el aditivo cristalino de tal forma que se facilite el sellado de grietas.
- Para estas probetas se encontró para el rango de valores de D entre [0.11 – 0.35], la relación de curación SH tiende a subir a medida que incrementa D, siempre y cuando existan suficientes productos de cristalización. Cuando D es menor a 0.10 la recuperación es baja o nula.
- Los resultados de esta investigación no pueden ser generalizados a otros casos debido a la alta dispersión en los datos y el bajo número de probetas ensayadas, se requiere de investigaciones con más datos que confirmen los hallazgos.

5. Recomendaciones

- En ensayos de ultrasonido en el hormigón se obtiene una alta dispersión en los datos, dificultando la determinación de resultados sólidos que puedan ser validados estadísticamente, por lo que se recomienda incrementar el tamaño de la muestra para reducir la variabilidad, además usar transductores de una frecuencia más elevada, como es de 200 kHz.
- Es necesario evaluar la incidencia del aditivo cristalino y la fibra en la resistencia a la compresión de las mezclas.
- Para futuras investigaciones se puede tratar de controlar el grado de daño en el hormigón de tal forma que los resultados sean comparables entre sí, a su vez se recomienda estudiar hormigones que sean fisurados en una edad más temprana y que tengan grados de daño más elevados que los presentados en esta investigación.

BIBLIOGRAFIA

- American Concrete Institute. (2017). ACI 224 Causas, evaluación y reparación de fisuras en estructuras de hormigón. *Comité ACI 224*, 1993.
- ASTM C 597-09. (2010). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete¹. *United States: American Society for Testing and Material.*, 04(02), 3–6.
- Azarsa, P., Gupta, R., Azarsa, P., & Biparva, A. (2021). Durability and self-sealing examination of concretes modified with crystalline waterproofing admixtures. *Materials*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/ma14216508>
- Azarsa, P., Gupta, R., & Biparva, A. (2019). Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. *Cement and Concrete Composites*, 99(February), 17–31. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.02.017>
- Cuenca, E., Tejedor, A., & Ferrara, L. (2018). A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. *Construction and Building Materials*, 179, 619–632. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.261>
- De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J. M., ... Jonkers, H. M. (2018). A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17), 1–28. <https://doi.org/10.1002/admi.201800074>
- Doostkami, H., Roig-Flores, M., & Serna, P. (2021). Self-healing efficiency of Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete through permeability to chlorides. *Construction and Building Materials*, 310, 125168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125168>
- Estacio Cumberbatch, J. de J. (2021). *Aplicación de bacterias en hormigón y mortero como método de autosanado*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Ferrara, L., Krelani, V., & Carsana, M. (2014). A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. *Construction and Building Materials*, 68, 535–551. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.008>
- Guaño, E., & Martínez, A. (2017). MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN EN BASE A SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE 21 MPa, ELABORADO CON AGREGADOS DEL SECTOR LA PROVIDENCIA Y CEMENTO CHIMBORAZO. *Universidad Nacional de Chimborazo*, 112.

<http://dspace.unach.edu.ec/bitstream/51000/1381/1/UNACH-EC-AGR-2016-0002.pdf>

Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). NEC-HM Estructuras De Hórmigon Armado. In *Norma Ecuatoriana de la Construcción*.

NTE INEN 2554. (2011). *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (utilizando una viga simple con carga en los tercios)*. 8.

NTE INEN 3124. (2017). Hormigón. Elaboración y curado de especímenes de ensayo de laboratorio. *Norma Técnica Ecuatoriana*.

Roig-Flores, M., Pirritano, F., Serna, P., & Ferrara, L. (2016). Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Construction and Building Materials*, *114*, 447–457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.196>

Sierra Beltran, G., Mera Ortiz, W., & Jonkers, H. M. (2017). Hormigón autoReparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: Principios y aplicaciones en Ecuador. *Alternativas*, *17*(3), 207–214. <https://doi.org/10.23878/alternativas.v17i3.229>

Singh, H., & Gupta, R. (2020). Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete. *Case Studies in Construction Materials*, *12*. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00324>

Solís Carcaño, R. G., Iván Moreno, É., & Castillo Pak, W. R. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. / *Ingeniería*, *8*(2), 41–52.

Souza, J. (2021). *¿Qué significan las grietas en las estructuras de hormigón?* <https://www.archdaily.cl/cl/880210/que-significan-las-grietas-en-las-estructuras-de-hormigon>

Suleiman, A. R., & Nehdi, M. L. (2018). Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, *111*(May), 197–208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.009>

Valcuente, M., Marco, E., Jardón, R., & Gil, A. (2009). Evolución de la resistencia del hormigón con la edad y la temperatura. *Universidad Politécnica de Valencia*, 8. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12793/Evolución resistencia hormigón.pdf](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/12793/Evolución%20resistencia%20hormigón.pdf)

Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials-a review. In *Materials* (Vol. 6, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/ma6062182>

Yıldırım, G., Khiavi, A. H., Yeşilmen, S., & Şahmaran, M. (2018). Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, *87*, 172–186.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.004>

Zhong, W., & Yao, W. (2008). Influence of damage degree on self-healing of concrete. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1137–1142.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.02.006>

Žižková, N., Nevřivová, L., & Lédl, M. (2018). Durability of cement based mortars containing crystalline additives. *Defect and Diffusion Forum*, 382 DDF, 246–253.

<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.382.246>