



UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIA DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO
AUTORREPARABLE CON ENCAPSULADO QUÍMICO DE SILICATO
DE SODIO Y CARBONATO DE CALCIO**

Autor:

BRIONES RAMIREZ GUSTAVO ROBERTO

La Libertad, Ecuador

2020



UNIVERSIDAD ESTATAL
PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIA DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

ANÁLISIS PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO
AUTORREPARABLE CON ENCAPSULADO QUÍMICO DE SILICATO
DE SODIO Y CARBONATO DE CALCIO

TRABAJO PRÁCTICO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Autor:

BRIONES RAMIREZ GUSTAVO ROBERTO

Tutor:

ING. RAÚL VILLOA VERA M.SC.

La Libertad, Ecuador

2020

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo del Componente Práctico, modalidad Examen de Grado de carácter Complexivo, denominado “ANÁLISIS PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO AUTORREPARABLE CON ENCAPSULADO QUÍMICO DE SILICATO DE SODIO Y CARBONATO DE CALCIO.”, elaborado por el Sr. BRIONES RAMIREZ GUSTAVO ROBERTO, me permito declarar que luego de haberlo dirigido, estudiado y revisado, lo apruebo en su totalidad.

TUTOR (A)



Ing. Raúl Villao Vera

La Libertad, a los 25 días del mes de septiembre del 2020.

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

YO, BRIONES RAMIREZ GUSTAVO ROBERTO

DECLARO QUE:

El trabajo integrador de grado denominado “ANÁLISIS PARA LA ELABORACIÓN DE MORTERO AUTORREPARABLE CON ENCAPSULADO QUÍMICO DE SILICATO DE SODIO Y CARBONATO DE CALCIO”, ha sido desarrollada con base en una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros conforme las referencias que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente este trabajo es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico del trabajo práctico de grado en mención.



Briones Ramírez Gustavo Roberto
AUTOR

DEDICATORIA

Lleno de felicidad, amor y esperanza, dedico este proyecto a mis padres, hermanos, hijo y amigos quienes han sido mis pilares para seguir adelante.

Es para mí una gran satisfacción poder dedicarles esto a ellos, que con mucho esfuerzo, esmero y trabajo lo he conseguido.

AGRADECIMIENTO

En primera instancia agradezco a Dios y a mi Familia por haber sido mi apoyo en cada decisión y proyecto. Luego, quiero agradecer a mis formadores, personas de gran sabiduría quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al punto en que me encuentro. No podría sentirme más dichoso con la confianza puesta sobre mi persona, especialmente por la directriz y guía de la Universidad Estatal Península de Santa Elena y sus docentes.

Sencillo no ha sido el proceso, pero gracias al esfuerzo y dedicación, he logrado importantes objetivos como poder culminar el desarrollo de mi tesis con éxito y obtener una afable titulación profesional.

Y para finalizar, agradezco el compañerismo de todos los que fueron mis compañeros de clases durante todos los niveles que corresponden a la carrera.

ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN DEL TUTOR	III
DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS	X
RESUMEN EJECUTIVO	XI
ABSTRACT	XI
INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1 Planteamiento del problema.....	2
1.2 Justificación de la investigación	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
UNIDAD II.....	5
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	5
2.1. Mortero	5
2.2. Silicato de sodio.....	5
2.3. Carbonato de calcio.....	5
UNIDAD III	6
DESARROLLO DEL TEMA “ANÁLISIS PARA LA ELABORACION DE MORTERO AUTOREPARABLE CON ENCAPSULADO QUIMICO DE SILICATO DE SODIO Y CARBONATO DE CALCIO”	6
3.1. Componentes de un mortero con encapsulado químico	6
3.1.1. Cemento.....	6
3.1.2. Áridos	6

3.1.3.	Arena	7
3.1.4.	Agente de auto reparación	7
3.1.5.	Compuestos químicos.....	7
3.1.6.	Encapsulado.....	7
3.2.	Aspectos generales del auto reparación de materiales de construcción.....	8
3.2.1.	Auto reparación autógena del hormigón	8
3.2.2.	Auto reparación basada en aditivos minerales	9
3.2.3.	Auto reparación basada en agentes adhesivos.....	9
3.2.4.	Bacterias precipitadoras de carbonato de calcio (caco3).....	9
3.3.	Elaboración de morteros de cemento utilizando especímenes cúbicos	10
3.3.1.	Composición del mortero	10
3.3.2.	Almacenamiento de las muestras	11
3.3.3.	Ensayo de resistencia a la compresión	11
3.4.	Análisis de resultados en los ensayos de mortero.....	12
3.4.1.	Propiedades del mortero fresco	12
3.4.2.	Propiedades del mortero endurecido	13
3.4.3.	Resistencia a la compresión simple de mortero.....	13
3.5.	Comprobación del fenómeno.....	15
3.5.1.	Tamaño de la fisura	15
3.5.2.	Proceso de encapsulado.....	15
3.5.3.	Composición del encapsulado y del hormigón.....	16
3.5.4.	Durabilidad del encapsulado	17
3.5.5.	Dosificación del encapsulado dentro del hormigón	17
3.6.	Explicación del fenómeno.....	17
3.7.	Cualidades y funciones de un hormigón autorreparable que alargan la vida útil de la estructura y mejoran sus propiedades	19
3.8.	Comportamiento del hormigón auto recuperable	21

3.9. Condiciones para el curado.....	21
3.10. Liberación de los agentes auto recuperadores.....	21
3.10.1. Liberación del carbonato de calcio	21
3.10.2. Liberación del silicato de sodio	22
3.11. Análisis para uso en edificaciones.....	22
CONCLUSIONES.....	24
RECOMENDACIONES	25
BIBLIOGRAFÍA	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Dosificación para mortero	11
Tabla 2: Propiedades del mortero fresco	12
Tabla 3: Propiedades del mortero endurecido, ensayo a la compresión.....	13
Tabla 4: Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión.....	14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Elaboración de morteros	10
Figura 2: Ensayo de resistencia a la compresión.....	11
Figura 3: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión	14
Figura 4: Proceso de encapsulado	16
Figura 5: Explicación grafica del fenómeno de auto recuperación	18
Figura 6: Proceso de rotura de la microcápsula.....	19
Figura 7: Fenómeno de curación con carbonato de calcio	21
Figura 8: Fenómeno de curación con silicato de sodio	22

RESUMEN EJECUTIVO

El mortero y el hormigón auto recuperable son nuevos materiales que se están estudiando, para introducirlos en el ámbito de la construcción, edificaciones y comunidades seguras. Con la ayuda de la ciencia e innovación del hormigón o mortero capaz de recuperar su resistencia, mediante la inclusión de un encapsulado químico con agentes curadores (silicato de sodio y carbonato de calcio) que permita auto sellar las fisuras. Una de las más actuales investigaciones realizadas por Nelson Cabezas y Richard Valarezo (2020), estudiaron la forma en como los agentes curadores recuperan las fisuras inducidas a elementos de hormigón y morteros, mediante ensayos de compresión simple a fin de validar la calidad del hormigón, en donde se logró evidenciar mediante ensayos de laboratorios que el auto recuperado se logra mediante la rotura de la microcápsula y la liberación del agente curador. El análisis se basa en el mencionado estudio, donde se explicará las ventajas y desventajas del uso del encapsulado en obras civiles y la efectividad según el porcentaje de encapsulado utilizado en la mezcla de mortero.

Palabras Claves: Microcápsula, Mortero, Resistencia, Agentes Curadores.

ABSTRACT

Mortar and self-healing concrete are new materials that they are studying, to introduce them in the field of construction, buildings and safe communities. With the help of science and innovation of concrete or mortar capable of recovering its resistance, the inclusion of a chemical encapsulation with curing agents (sodium silicate and calcium carbonate) that allows self-sealing of cracks. One of the most current investigations carried out by Nelson Cabezas and Richard Valarezo (2020), studied the way in which curing agents recover the cracks induced in concrete elements and mortars, through simple compression tests in order to validate the quality of concrete, where it was possible to demonstrate through laboratory tests that the auto recovered was achieved by breaking the microcapsule and the release of the curing agent. The analysis is based on the aforementioned study, where the advantages and disadvantages of the use of encapsulation in civil works and the effectiveness according to the percentage of encapsulation used in the mortar mixture will be explained.

Keywords: Microcapsule, Mortar, Resistance, Curing Agents.

INTRODUCCIÓN

El mortero es un material muy importante que contribuye de forma estructural y estética en una construcción; si su finalidad es la de pega de mampostería, este debe cumplir con parámetros físicos de consistencia, retención de agua y plasticidad. Cuando su uso es de relleno o grout debe cumplir con parámetros mecánicos de buena resistencia a la compresión y parámetros físicos de trabajabilidad para tener un buen desempeño al ser vertido en espacios entre bloques y acero de refuerzo. El uso no estructural del mortero que recubre la mampostería y le da un acabado estético consta de una buena plasticidad que le permite ser champeado en superficies, además de resistencia a la contracción y retracción en el proceso de fraguado sin agrietamientos.

En Ecuador existen diversas investigaciones proyectadas a desarrollar materia prima que sea capaz de cumplir con las exigencias de un mortero de calidad, sin embargo, existen falencias en la utilización de los agregados para que desarrolle un óptimo desempeño en temas de trabajabilidad y comportamiento mecánico bajo cargas de compresión actuales.

La principal afectación en un mortero es el agrietamiento, el mismo que no implica un daño estructural, pero por motivos serviciales y estéticos se los pretende mitigar durante el proceso de fraguado. Las grietas aun siendo las más finas permiten el ingreso de oxígeno, agua, agentes agresivos hacia los elementos estructurales ya sea el hormigón armado o estructura metálica. Este trabajo busca determinar el uso del encapsulado químico compuesto de silicato de sodio y carbonato de calcio, como complemento a morteros con el fin de incrementar la capacidad de auto reparación de este si sucede el agrietamiento.

Todo este proceso consiste en la creación de un polímero copolímero el cual tiene como característica principal la formación de una cadena infinita, encapsulando el agente curativo.

Por lo expuesto, se analizara la investigación realizada por Cabezas N. y Valarezo R (Cabezas Cantos & Valarezo Arciniega) denominada “Hormigón auto recuperable con encapsulado químico”, para determinar su aplicación a gran escala y el impacto económico que puede ocasionar.

UNIDAD I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Los elementos estructurales y no estructurales conformantes de un sistema estructural, en conjunto deben poseer una vida útil considerable con un excelente desempeño servicial, si los elementos estructurales presentan deformaciones no controladas o generan vibraciones excesivas bajo condiciones de servicio no brindará confianza de uso a sus ocupantes, así mismo si su acabado o recubrimiento presenta condiciones de agrietamiento severos genera una percepción desfavorable. La resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad son los parámetros del hormigón que definirán el comportamiento de la estructura ante las diferentes cargas o controles propios del diseño.

La presencia de fisuras en el hormigón se las relaciona con los trabajos realizados en obra, estas pueden ser por falta de experiencia de los obreros, por condiciones del lugar de construcción, negligencia del proyecto y efectos de vibraciones ocasionados por sismos durante la vida útil de la estructura. Estas fisuras se las distinguen por la edad de aparición, abertura, forma y trayectoria. Todas estas causas son indispensables como medida previa a la reparación. Por medio de las fisuras pueden ingresar agentes químicos que pueden alterar las propiedades del hormigón.

Por lo mencionado, acerca de las fisuras y sus problemas que se pueden presentar en una estructura, se analiza la investigación de Cabezas Cantos (Cabezas Cantos & Valarezo Arciniega) sobre el hormigón y mortero autor recuperable mediante encapsulado químico con compuestos de silicato de sodio y carbonato de calcio. Esta investigación consiste en la creación de un poliuretano copolímero en donde se encapsula el agente curativo, y este es libera cuando ocurre una fisura.

1.2 Justificación de la investigación

En todas las edificaciones en donde interviene el hormigón aparecen fisuras y micro fisuras, estas pueden presentarse al año, meses, semanas y en casos más desfavorables en horas. Su detección no es una tarea fácil y sus causas pueden ocurrir por diversas acciones, tales como: Curado deficiente, variaciones de temperatura, ataque químico, exceso de carga, asentamientos diferenciales, errores de proyecto y ejecución, entre otras.

Las apariciones de estas fisuras es uno de los factores que determina la durabilidad de una estructura, puesto que estas generan cambios negativos en la resistencia y en las propiedades innatas del hormigón. Por lo mencionado, las fisuras provocan un incremento considerado en el costo de la estructura por costos de mantenimiento y a su vez genera una disminución de su vida de servicio.

En la investigación, donde se pretende reparar las grietas generadas en la fase inicial de la construcción y en la fase después de la construcción, mediante la adición de un agente recuperador encapsulado con procesos de polimerización, este método puede llegar a auto reparar fisuras de 0,1mm a 0,2mm, con el fin de impedir el ingreso de agentes agresivos presentes en el ambiente hacia elementos estructurales y mejorar las propiedades en estado endurecido.

Los mencionados agentes curativos encapsulados deben estar repartidos uniformemente por toda la mezcla, para lograr satisfactoriamente el proceso de auto recuperación.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Analizar la elaboración del mortero autorreparable con encapsulado químico de silicato de sodio y carbonato de calcio.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Comparar el comportamiento del mortero convencional con el encapsulado con Carbonato de Calcio y Silicato de Sodio.
- Determinar el beneficio que se obtiene al implementar los compuestos silicato de sodio y carbonato de Calcio.
- Explicar mediante el análisis, el uso del encapsulado con compuestos de silicato de sodio y carbonato de calcio en obras civiles.

UNIDAD II

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

2.1. Mortero

Mezcla de conglomerantes inorgánicos, áridos (finos) y agua, y en algunos casos adiciones y aditivos. (NEC-SE-VIVIENDA, 2015)

Dentro del comportamiento mecánico del mortero se estudia, analiza y discute las propiedades mecánicas del concreto o mortero elaborado, éste se compone básicamente de cemento, agregado fino, agua y aditivo. El comportamiento mecánico puede evaluarse a compresión, corte, flexión y anclaje por adherencia. (NEC-SE-VIVIENDA, 2015)

2.2. Silicato de sodio

Sustancia inorgánica, conocida como “vidrio soluble”, se la encuentra en soluciones acuosas y también en forma sólida. Usado en la producción de aditivos para el concreto, detergentes, jabones, adhesivos en la industria del papel y el cartón. Una de las ventajas del silicato de sodio en el hormigón, es aumentar la durabilidad. (Amaris Martínez & Rondón Panqueva, 2009)

El silicato de sodio es utilizado como agente curador en hormigones y morteros en estado fresco y endurecido. En estado fresco se aplica el silicato en la superficie, luego de que el área esté cubierta se la debe mantener húmeda durante 24 horas, esta aplicación cierra los poros de la superficie sellándolos mientras esté húmeda. En estado endurecido se aplica el silicato hasta penetrar el hormigón, en donde la cal y otros componentes reaccionan lentamente formando un gel insoluble en los poros del hormigón.

2.3. Carbonato de calcio

Sustancia de polvo blanco con cristales incoloros, insolubles en agua y alcohol, este solo puede ser soluble con ácidos. Su fórmula química es CaCO_3 y se encuentra de modo muy frecuente en la naturaleza, en caparazones y conchas de algunos animales marinos o en rocas, resultando su elemento esencial. Utilizado principalmente en la producción de vidrio y cemento (Beltrán, Ortíz, & Jonkers, 2016).

UNIDAD III

DESARROLLO DEL TEMA “ANÁLISIS PARA LA ELABORACION DE MORTERO AUTOREPARABLE CON ENCAPSULADO QUIMICO DE SILICATO DE SODIO Y CARBONATO DE CALCIO”

Este análisis se enfoca en el diseño del hormigón auto recuperable con encapsulado que utiliza como agente de curación el silicato de sodio y el carbonato de calcio. Para el análisis se procedió a estudiar la investigación de Nelson Cabezas y Richard Valarezo (Cabezas Cantos & Valarezo Arciniega), en su tesis denominada “Elaboración de hormigón auto recuperable con encapsulado químico”, donde nos brinda una información sobre la elaboración del encapsulado, la dosificación del hormigón y mortero, y los resultados de las propiedades físicas y mecánicas.

3.1. Componentes de un mortero con encapsulado químico

3.1.1. Cemento

Se define como un cemento a un material adherente y cohesivo capaz de pegar un material sólido en una masa compacta, se produce a raíz de la pulverización del Clinker, que consiste esencialmente de silicatos cálcicos hidráulicos y que por lo general contiene algunos de los siguientes elementos químicos: Sulfato de calcio, hasta 5% de piedra caliza y adiciones en el proceso (NTE INEN 151). Las características del cemento portland en Ecuador se establecen en la norma NTE INEN 152. La densidad del cemento es un factor importante para realizar la dosificación y fabricación del mortero.

3.1.2. Áridos

Materiales pétreos conformados con partículas duras de forma y tamaño estables. Son utilizados principalmente en hormigón mas no en mortero con un volumen de entre 65% y 75% del volumen total, y entre sus funciones está la de entregar docilidad al hormigón fresco, aumentar la durabilidad de las estructuras, aumentar la resistencia, reducir el costo de las mezclas.

3.1.3. Arena

Es un árido fino pasante del tamiz de abertura nominal de 5 mm y retenido en el de 0,08mm. Se considera como árido fino para mortero a aquel que cumpla con las especificaciones dictadas en la NTE INEN 872 o ASTM C330.

3.1.4. Agente de auto reparación

El agente de auto reparación es un factor adicional al material. En el caso del mortero se han comprobado su factibilidad ciertos aditivos como: minerales, agentes aditivos y biológicos, y cada uno tiene su propio mecanismo para la incorporación a la mezcla con fin de no intervenir negativamente en las propiedades y de mantenerse protegido hasta el momento en que se genere la fisura.

Para el desarrollo de esta investigación se va a analizar la utilización de los compuestos químicos para la auto reparación del mortero como los son el silicato de sodio y el carbonato de calcio.

3.1.5. Compuestos químicos

Es cualquier sustancia que se conforma por la unión de 2 o más elementos químicos, mediante sus respectivos enlaces de alguna clase. Un compuesto puede convertirse en una composición química diferente producida por una interacción con otro compuesto a través de las reacciones químicas. En este proceso los enlaces entre átomos se dividen en ambos compuestos que interactúan, y luego los enlaces se reagrupan para obtener nuevas asociaciones entre mismos átomos.

3.1.6. Encapsulado

Existen varias alternativas para realizar el encapsulado de los agentes recuperadores, como son Poliuretano copolímero, resinas epóxicas, gomas cloradas, ceras, acrílicos, y siloxano. Pero estas deben tener un buen comportamiento interno y externo, y a su vez deben modificar o alterar las propiedades del hormigón, por lo expuesto, en dicho estudio, solo se realizó el encapsulado químico.

3.1.6.1. Encapsulado químico

Para la dosificación y fabricación del mortero, en la matriz del cemento se utilizó el encapsulado químico a través de poliuretano formado por un copolímero en donde se usó como agente curativo el silicato de sodio y carbonato, estas se usaron en varias proporciones (2% y 3%), con este porcentaje no existe la posibilidad que haya interferencias en las propiedades mecánicas y físicas del hormigón.

Se utilizó como referencia el trabajo de Nelson Cabezas y Richard Valarezo (Cabezas Cantos & Valarezo Arciniega) quien realizó “Elaboración de hormigón autor recuperable con encapsulado químico”, en el cual utilizaron un porcentaje mayor del encapsulado químico con el fin de lograr mejores resultados.

3.2. Aspectos generales del auto reparación de materiales de construcción

La mayoría de los materiales construidos por el hombre no poseen la propiedad de auto repararse. Sin embargo, se han ido desarrollando nuevas tecnologías de construcción que buscan generar la auto reparación de ciertos materiales utilizados en la construcción. Su principal ventaja es evitar las grietas u otros deterioros que son difíciles de detectar en una etapa prematura, y se requiere intervención del hombre para su corrección.

En términos más sencillos, un material auto reparable es aquel que logra recuperar sus propiedades iniciales de manera autónoma, mediante su interacción con el ambiente y con limitada intervención del ser humano.

3.2.1. Auto reparación autógena del hormigón

La auto-reparación autógena se refiere a la capacidad de sellar o rellenar las grietas y poros del hormigón de manera espontánea, sin intervención humana previa ni posterior, es decir es una cualidad inherente del hormigón. Se produce mediante la hidratación de las partículas de cemento no hidratadas en la fase de curado, por el bloqueo de la trayectoria de flujo por las impurezas del agua y debido a la formación de cristales de calcita.

3.2.2. Auto reparación basada en aditivos minerales

Consiste en la adición de aditivos minerales en la etapa de mezclado del hormigón que al quedar expuestos se producen grietas, reaccionan con el agua y logran rellenarlas. Los aditivos pueden ser de tipo de cristalización o expansivos. Los de tipo de cristalización contienen sílice y algunos catalizadores que reaccionan con la portlandita (Ca (OH)_2) formando cristales, mientras los de tipo expansivos reaccionan con el agua, aumentando su volumen.

Esta manera de auto reparación ha resultado muy beneficiosa, ayudando con la disminución de la permeabilidad y ser bastante rápida. Sin embargo, los aditivos deben ser protegidos al momento de realizar la mezcla, sino estos comienzan a reaccionar inmediatamente y se consumen antes de la falla de agrietamiento. Además, el mecanismo requiere que la fisura sea humedecida.

3.2.3. Auto reparación basada en agentes adhesivos

Un agente adhesivo se utiliza para que se endurezca en las grietas y conecta ambas superficies de estas. Puede realizarse como un componente o varios componentes simultáneamente que se encuentran encapsulados y reaccionan cuando son interceptados por la grieta. Dentro de la lista de agentes que son usados con este fin está el Epoxi, metacrilato de metilo, silicio, aceite de madera y cian acrilato.

3.2.4. Bacterias precipitadoras de carbonato de calcio (CaCO_3)

La precipitación de carbonato de calcio es un proceso de biomineralización que ocurre a través de las actividades metabólicas de ciertas especies bacterianas en varios ambientes naturales, incluidos los suelos, estructuras geológicas, ríos, océanos, lagos de sal, entre otros; destacando que estos microorganismos juegan un papel fundamental en el ciclo biogeoquímico de calcio contribuyendo a la formación de carbonato de calcio, sedimentos, depósitos y rocas. En este sentido, algunos estudios indican el potencial de ciertos *Bacillus* que actúan como agentes biomineralizantes debido a su capacidad para generar la enzima uresa.

3.3. Elaboración de morteros de cemento utilizando especímenes cúbicos

Para la elaboración de los cubos de mortero se utilizó la norma ASTM C109/C109M-11b, este método nos ayuda con la determinación de la resistencia a la compresión de mortero utilizando muestras cubicas de 50 mm.



*Figura 1: Elaboración de morteros
Fuente: Laboratorio de suelos
Elaborado por: Briones Gustavo*

Las muestras para el ensayo se deben compactar por apisonamiento en dos capas, los especímenes se curan 24 horas en el molde, luego se los desmolda y son sumergidos en agua, para su posterior ensayo.

El número de muestras a ensayar se determinó mediante la comprobación de fenómeno, como la determinación de la resistencia, en donde se tomó en cuenta las limitaciones que se tiene por motivos de la elaboración del encapsulado a gran escala. De esta manera se procedió a realizar 6 cubos de mortero, donde en 3 cubos se utilizó un porcentaje de 2% y en los cubos restantes un porcentaje de 3% del encapsulado.

3.3.1. Composición del mortero

La dosificación para realizar 3 especímenes de mortero consta de 1 parte de cemento y 2,75 parte de arena, para que se produzca un flujo adecuado se utilizó la relación agua/cemento de 0.60.

Tabla 1: Dosificación para mortero

Numero de especímenes	
3	
Cemento (g)	500
Arena (g)	1375
Agua (ml)	300

Fuente: (Cabezas Cantos & Valarezo Arciniega, 2020)

La preparación de la mezcla de mortero deber ser mecánica, tal como indica la norma ASTM C305.

3.3.2. Almacenamiento de las muestras

Una vez realizado los moldes de especímenes, estos son colocados en un cuarto húmedo, durante 24 horas, estos deben estar tapados con paños o franelas húmedas para protegerlos del goteo de agua. Pasada las 24 horas, las muestras son sumergidas en agua limpia hasta el momento que se les realiza el ensayo a compresión.

3.3.3. Ensayo de resistencia a la compresión

Las muestras son sometidas a cargas axiales, para determinar las propiedades del mortero o el comportamiento del mismo frente a una sollicitación externa.



Figura 2: Ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: Laboratorio de suelos

Elaborado por: Briones Gustavo

Se registra la carga total máxima indicada por la máquina de ensayo y se calcula la resistencia a la compresión:

$$f_m = P/A$$

Donde:

P = Carga total máxima [N]

A = Área de la superficie [mm²]

3.4. Análisis de resultados en los ensayos de mortero

3.4.1. Propiedades del mortero fresco

En la investigación se analizaron los casos de mortero convencional y mortero flexible, debido a que se obtuvieron las mismas propiedades para los cubos, tanto para los cubos con encapsulado y sin encapsulado. Dicho estudio se realizó para establecer los cambios presentados en las propiedades de las dos mezclas. Las propiedades de homogeneidad, consistencia, trabajabilidad, cohesión y exudación son las que se analizaron en esta investigación.

Tabla 2: Propiedades del mortero fresco

Propiedades	Consistencia	Trabajabilidad	Homogeneidad	Cohesión	Exudación
Mortero fresco	Plástico	Alta	Alta	Alta	Alta

Fuente: (Cabezas Cantos & Valarezo Arciniega, 2020)
Elaborado por: Briones Gustavo

Las mezclas de mortero convencional con encapsulado presentaron características adecuadas, estas permiten un buen mezclado y fraguado del mortero, este a su vez facilita el homogenizar el encapsulado por toda la mezcla.

3.4.2. Propiedades del mortero endurecido

La resistencia a la compresión fue una de las propiedades que se determinó en el mortero endurecido, en el cual se comparó entre el mortero convencional y el mortero con los encapsulados, con el propósito de verificar si el agente curador actúa frente a las microfisuras que se realizaron en cada muestra.

Los resultados del ensayo de resistencia a la compresión de mortero endurecido se muestran en la tabla 3.

Tabla 3: Propiedades del mortero endurecido, ensayo a la compresión

Identificación		Dimensiones		A	Carga (15 días)		Esfuerzo	Carga (28 días)		Esfuerzo
		cm	mm ²	KN	N	Mpa	Kgf	N	Mpa	
Mortero convencional sin encapsulado	MC1	5,15	5,13	2641,95	34,345	34345	13,00	3516	34491,96	13,055
	MC2	5,1	5,12	2611,20	33,926	33926	12,99	3324	32608,44	12,488
	MC3	5,13	5,15	2641,95	35,194	35194	13,32	3589	35208,09	13,327
Mortero con encapsulado de 3% carbonato de calcio	C1	5,05	5,1	2575,50	34,618	34618	13,44	5919	58065,39	22,545
	C2	5,1	5,05	2575,50	33,88	33880	13,15	6679	65520,99	25,440
	C3	5,2	5,1	2652,00	35,853	35853	13,52	7377	72368,37	27,288
Mortero con encapsulado de 2% silicato de sodio	S1	5,1	5,1	2601,00	35,367	35367	13,60	6406	62842,86	24,161
	S2	5,1	5,12	2611,20	34,18	34180	13,09	5940	58271,4	22,316
	S3	5,15	5,13	2641,95	35,28	35280	13,35	6236	61175,16	23,155

Fuente: (Cabezas Cantos & Valarezo Arciniega, 2020)

Elaborado por: Briones Gustavo

3.4.3. Resistencia a la compresión simple de mortero

Los resultados obtenidos en los ensayos de compresión en cubos, determinaron que existió un auto recuperación en las muestras, estos cubos fueron ensayados a los 15 días y sometidos hasta el límite de fluencia para provocar las microfisuras, luego de esto, se dejó las muestras en la cámara de curado por 13 días más, hasta llegar a los 28 días, en donde se comprobó que mejoró la resistencia del mortero con el agente curador en comparación con el mortero convencional, como se muestra en la tabla 4.

El mortero con encapsulado no solo cumplió el objetivo de rellenar la fisura sino también logro mejorar sus propiedades de resistencia. Esto sucede porque las fisuras han sido llenadas con el agente curador, reduciendo los espacios vacíos que provocarían la disminución de resistencia.

Tabla 4: Resultados del ensayo de la resistencia a la compresión

IDENTIFICACIÓN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	
	MPa	
	15 días	28 días
MEZCLA CONVENCIONAL	13,10	12,96
MEZCLA CON ENCAPSULADO DE CARBONATO DE CALCIO	13,37	25,09
MEZCLA CON ENCAPSULADO DE SILICATO DE SODIO	13,35	23,21

*Fuente: Ensayo de compresión
Elaborado por: Briones Gustavo*

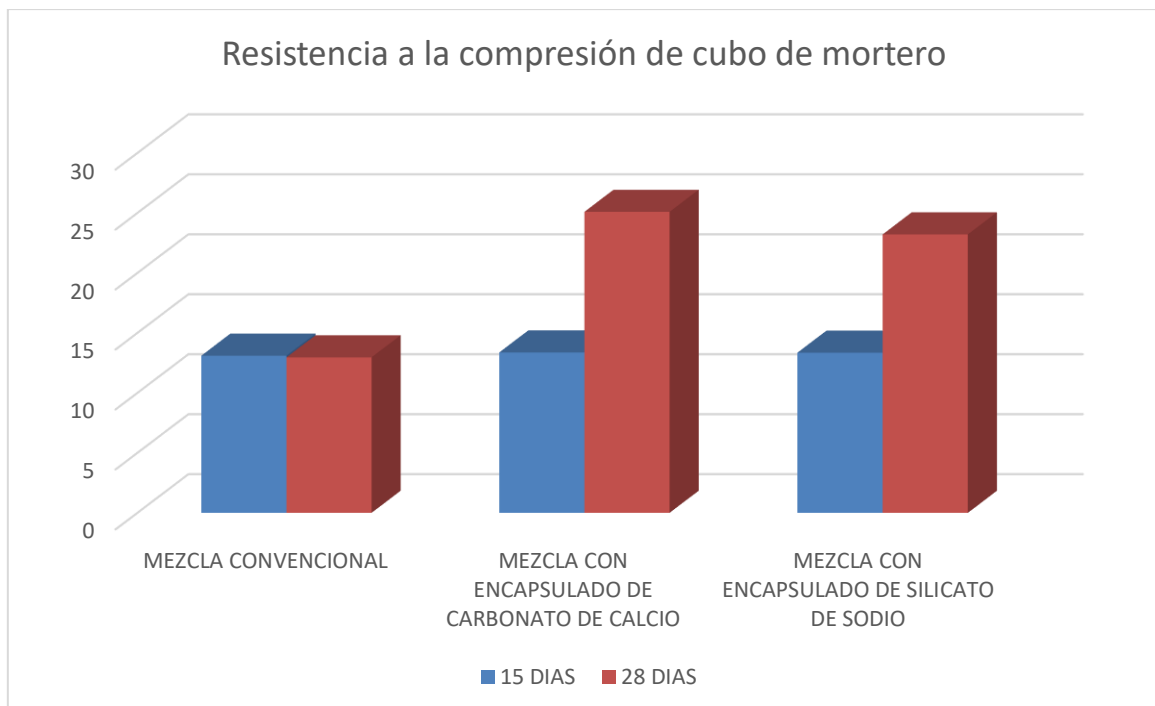


Figura 3: Resultados del ensayo de resistencia a la compresión

*Fuente: Ensayo de compresión
Elaborado por: Briones Gustavo*

Las muestras de mortero analizadas tuvieron diferentes procesos de curado, un grupo de muestras se las mantuvo en el laboratorio en condiciones óptimas de curado, mientras el otro grupo se las mantuvo en condiciones de ambiente controlado. Este proceso de auto recuperación puede aplicarse en obras civiles, pero se debe controlar el proceso de curado, y a su vez se deben mantener las condiciones y propiedades del hormigón. Si no se controlan estas recomendaciones, la efectividad del encapsulado puede verse afectada.

3.5. Comprobación del fenómeno

Para esta comprobación se realizaron 3 cubos de mortero para muestra de encapsulado de silicato de sodio y 3 muestras con encapsulado de carbonato de calcio, para lo cual se introdujo el encapsulado en los porcentajes antes establecidos 2 y 3% respectivamente, teniendo en cuenta que el fenómeno actuaba de manera eficaz en estudios anteriores para 1% y 2%, este porcentaje se aumentó, con el fin de conseguir mejores resultados sin alterar la composición y características del hormigón.

Luego de 15 días de curado del mortero que es lo establecido en esta investigación, los cubos fueron sometidos a ensayos de compresión solo hasta la zona elástica para simular las fisuras y su comportamiento común en la colocación de obras.

3.5.1. Tamaño de la fisura

La investigación realizada se enfoca en fisuras de hasta 0,15 mm, una vez que la fisura penetra el poliuretano encapsulado esta libera al agente reparador, en este caso el silicato de sodio o el carbonato de calcio, ocasionando el sellado de la fisura de manera automática, pero por las características del encapsulado, no se puede asegurar una auto reparación en fisuras de tamaños mayores.

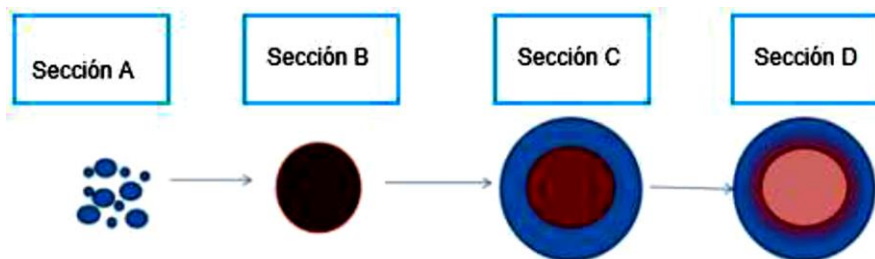
3.5.2. Proceso de encapsulado

Las capsulas dan una protección mecánica directa al agente reparador y solo liberan al ser activadas por las grietas, humedad, aire o un cambio de pH de la solución de poros. Debido

al craqueo como mecanismo desencadenante, el encapsulado se rompe y la grieta mediante acción capilar es reparada por el agente cicatrizante.

El objetivo del encapsulado es darle una mayor vida útil al agente reparador sean estos químicos o biológicos y controlar sus liberaciones en la matriz. Lo que sugiere que el enfoque basado en capsulas es versátil y la calidad de la reparación es satisfactoria, y se mide por lo general por la recuperación de las propiedades mecánicas y de durabilidad.

El mayor desafío con el enfoque basado en capsulas es su repetitividad a un plazo largo. Debido a que las estructuras de hormigón tienen variados ciclos de daños en su vida útil, se espera que un sistema de encapsulado ofrezca diferentes instancias de curación de calidad dependiendo de las características de los compuestos químicos que serán encapsulados como agentes reparadores. Las cantidades de agentes reparadores que pueden ser encapsuladas son limitadas y por lo tanto, la mayor parte de agentes de curación es utilizado en un solo ciclo de carga y eso ocasiona que sea cuestionable la curación repetida a largo plazo.



*Figura 4: Proceso de encapsulado
Fuente: (Hermida, 2011)*

3.5.3. Composición del encapsulado y del hormigón

La composición del encapsulado se adecúa a las propiedades del hormigón y de la mezcla del mortero cumpliendo con el objetivo de la investigación que es la de crear un hormigón auto reparable, ayudando a subsanar las fisuras por la adición del copolímero para evitar la filtración de agua y la penetración de agentes dañinos a la estructura.

El hormigón aumenta de temperatura debido al cemento y su generación del calor de hidratación al estar en contacto con polímero y al tener entre sus propiedades la de la resistencia al calor, por esta acción y al ser el copolímero termoplástico este puede calentarse

y reconfigurar su composición a fin de que se amolde a las características del hormigón, obteniendo como resultado un material adaptado a la composición del hormigón.

3.5.4. Durabilidad del encapsulado

El copolímero como encapsulado químico del carbonato de calcio y del silicato de sodio, tendrá una durabilidad que va en función de la presencia de grietas ya que a la aparición de una el encapsulado cumplirá con la función de reventarse y generar que el agente reparador actúe sellando la fisura, todo este proceso dependerá de la cantidad de encapsulado que sea introducido a la mezcla, en este caso el 2 y 3%, la unión del encapsulado con la mezcla de hormigón no modificara las propiedades del mismo, haciendo que conserve su composición establecida.

3.5.5. Dosificación del encapsulado dentro del hormigón

La inclusión de aditivos a la mezcla de hormigón permite modificar sus propiedades físicas en estado fresco y proyectar un mejor desempeño en su estado fraguado, el uso de éstos ha conseguido excelentes transformaciones en el hormigón, esto ha causado que deje de ser un componente más del hormigón y actualmente sea necesaria su utilización, las cantidades que son permitidas adicionar a la mezcla están limitadas a cantidades menores al 5% en peso de contenido de cemento en el hormigón. (TEBAR, 1994)

Según la norma española UNE 83-200-84, los aditivos se definen como:

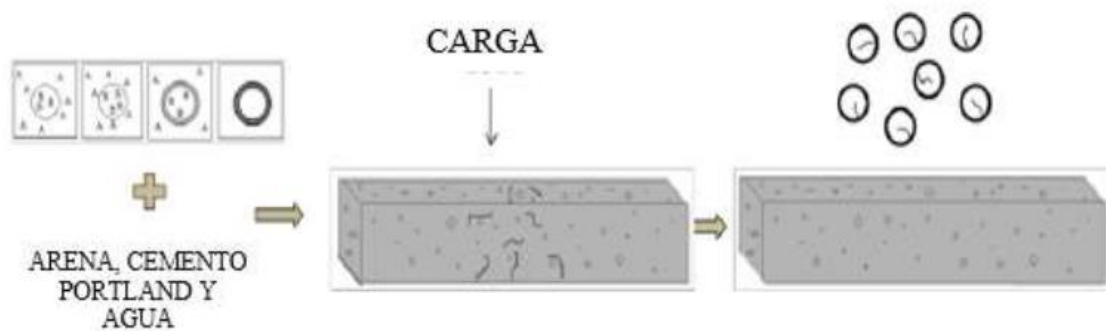
"Aquellas sustancias o productos que incorporados al hormigón, mortero o pasta antes o durante el amasado y/o durante un amasado suplementario, en una proporción no superior al 5 % del peso de cemento (salvo casos especiales), producen la modificación deseada en dicho hormigón, mortero o pasta en estado fresco y/o endurecido de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento."

3.6. Explicación del fenómeno

Las grietas que se forman dentro de la estructura del hormigón se pueden curar por medio de un polimérico estructural encapsulado. Un agente reparador micro encapsulado como en este caso lo son el carbonato de calcio y silicato de sodio, cuando ocurre la fractura o el agrietamiento estos son liberados. Cuando el agente curador entra en contacto con el catalizador integrado ocurre un proceso de agrupación química, a esto se lo denomina

polimerización, el cual ayuda que el agente curador permanezca dentro de las microcápsulas, hasta que este se encuentre en presencia de una fisura.

La cicatrización autónoma reside en ser capsulas de polimerización que tienen extremos de cadena que no terminan. Esto permite que la matriz de encapsulado cure varias grietas simultáneamente. (Hermida, 2011)



*Figura 5: Explicación grafica del fenómeno de auto recuperación
Fuente: (Hermida, 2011)*

Los especímenes realizados (cubos) fueron sometidos al proceso de fractura como se muestra en la figura 5, a fin de corroborar el fenómeno y de poder obtener los esfuerzos mecánicos propios de la investigación: resistencia a compresión, módulo de rotura, módulos de elasticidad estático.

Luego de realizar las probetas, se las almacenaron por 24 horas, posteriormente se las desencofró y se las dejó en el cuarto de curado por 13 días. Pasado este tiempo, se procedió a realizar el ensayo, aplicando una carga axial solo hasta el límite de fluencia, provocando las fisuras en el hormigón y que las microcápsulas puedan romperse y liberar el agente curador como se muestra en la figura 6, con este procedimiento se reparará la fisura y a su vez mejorará las propiedades mecánicas del elemento.

Luego del proceso mencionado anteriormente, se procedió a almacenar las muestras por 15 días más, para luego ensayarlos hasta el límite de rotura para así obtener los resultados finales y poder analizar el efecto de implantar el copolímero dentro de la matriz.

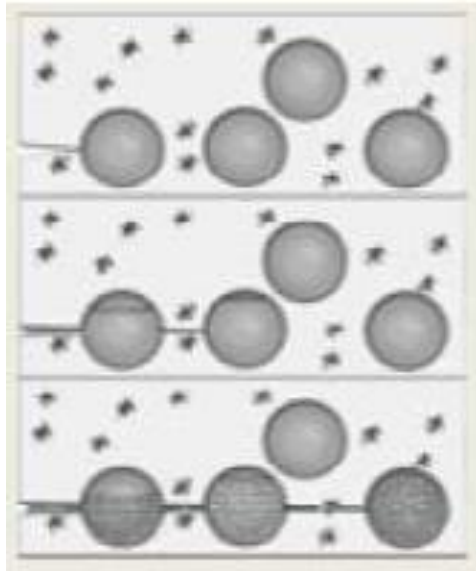


Figura 6: Proceso de rotura de la microcápsula
Fuente: (Hermida, 2011)

Denominaremos autocuración, al proceso en el cual el encapsulado se rompe y libera el agente de curación formando gel de silicato de sodio hidratado y un polvo de carbonato de calcio, donde las mismas sellarán las grietas.

3.7. Cualidades y funciones de un hormigón autorreparable que alargan la vida útil de la estructura y mejoran sus propiedades

En todas las construcciones uno de los aspectos que marcan el cálculo de una estructura es el estado límite de figuración, esto es casi imposible de evadir o evitar, el problema se centra en que el agua, sustancias agresivas o agentes atmosféricos externos ingresen hacia el interior del hormigón, donde las mismas provocarían patologías que pueden comprometer el acero del elemento y disminuir sus propiedades mecánicas. (Hermida, 2011)

El principal reto de crear un hormigón autorreparable amigable con el medio ambiente y que mejore la vida útil de la estructura afrontando ocurrencias de desastres naturales y las deficiencias de su construcción, brindando grandiosas ventajas frente al hormigón convencional, puesto que la implementación del encapsulado químico como agente curador ayuda a reparar el elemento internamente al tener la presencia de micro fisuras no mayores a 0.15mm.

En comparación con los hormigones convencionales los mantenimientos o reparaciones en las estructuras solo se las realiza externamente, pero antes de realizar dichas acciones se debe efectuar una evaluación previa del elemento para determinar qué acciones técnicas correctivas se recomienda utilizar, tales como: reconstrucción de recubrimiento del elemento, refuerzo de la estructura provocada por el ingreso de agentes agresivos, inyección de epoxi, entre otras.

Al utilizar un hormigón resiliente se notará el cambio favorable en sus propiedades mecánicas, puesto que se aprecia un aumento en la resistencia del elemento, además que al reparar micro fisuras presentadas el mismo evita la filtración de agua e impide que agentes agresivos penetren dentro del interior del hormigón provocando daños al elemento y su composición interna.

Las ventajas que proporcionan el hormigón o el mortero auto recuperable como material para la construcción son las mencionadas a continuación:

- Seguridad

Una de las principales características que proporciona el encapsulado es evitar el ingreso de agentes agresivos a la matriz del hormigón, esto permite tener construcciones con una mayor vida útil conservando la integridad de la estructura.

- Conservación de la estructura

Este hormigón auto recuperable es resistente ante ambientes climatológicos adversos, por motivos de que las micro capsulas se activan con estas condiciones atmosféricas, liberando así el agente reparador.

- Economía

El diseño de este hormigón resiliente debe garantizar que la estructura pueda resistir lo suficiente para asegurar la protección, salvaguardando la integridad de sus habitantes. Así como también reducir el impacto económico que pueda ocasionar.

- Sostenibilidad

Una gran ventaja de este tipo de hormigón es que puede ser reutilizado al 100%, puesto que al evitar que ingresen agentes agresivos durante su vida de servicio, este no estará contaminado por sustancias que eviten su reutilización.

3.8. Comportamiento del hormigón auto recuperable

Este mecanismo es considerado como un tratamiento activo reparador de fisuras interiores y exteriores, este, al contar con un mecanismo de poliuretano con propiedades termoplásticas se amolda a la matriz del hormigón.

3.9. Condiciones para el curado

El curado consiste básicamente en mantener la humedad de la mezcla, evitando que se evapore el agua necesaria y así conservar la proporción de agua cemento y se complete el proceso de fraguado.

De los factores como la humedad y las condiciones ambientales dependerá el éxito de un apropiado curado y de un correcto funcionamiento del encapsulado químico.

Las condiciones de curado en obra serán diferentes a las que se realizaron en la presente investigación, ya que en obra no hay un control adecuado. Pero de igual manera el agente recuperador se activará porque estará en contacto con las condiciones de humedad.

A gran escala, la efectividad del encapsulado puede quedar en duda, puesto que no serían los mismos resultados proporcionados de esta investigación.

3.10. Liberación de los agentes auto recuperadores

3.10.1. Liberación del carbonato de calcio

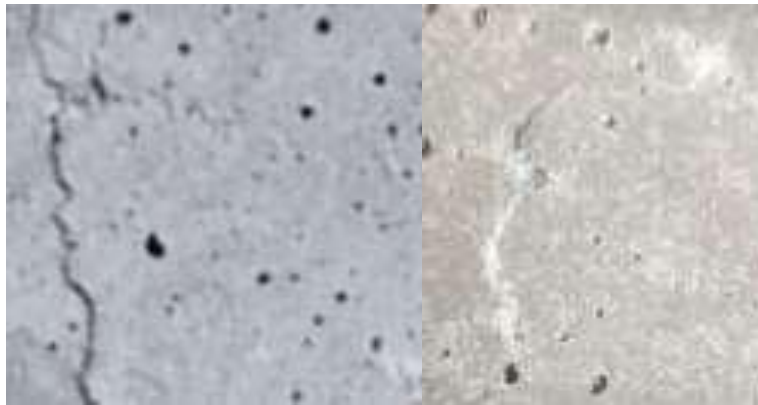
En la muestra de mortero, se visualizó el liberado del agente curativo del carbonato de calcio cuando se presencié la fisura, el agente formó una masa rellenando la fisura, al momento que se rompió la micro capsula liberó el encapsulado en forma de polvo que ayudó al proceso de auto recuperación.



*Figura 7: Fenómeno de curación con carbonato de calcio
Fuente: (Cabezas Cantos, 2020)*

3.10.2. Liberación del silicato de sodio

De la misma manera, se observó en la muestra de mortero la liberación del silicato de sodio del encapsulado, presentó características propias de consistencia y densidad al ser introducido dentro del poliuretano. Estas microcápsulas al estar en presencia al presenciar una fisura, se rompe y libera el agente, formando una masa en forma de gel, el cual rellena la grieta en condiciones de curado que favoreció y garantizó el proceso de recuperado.



*Figura 8: Fenómeno de curación con silicato de sodio
Fuente: (Cabezas Cantos, 2020)*

3.11. Análisis para uso en edificaciones

Es muy común el uso de aditivos en la construcción de edificaciones, generalmente las mayores edificaciones cumplen con estrictos parámetros de dosificación, mezclado y colocación de hormigón en obra, al cumplir con todas las especificaciones y normas de calidad, su vida útil es de 50 años, y para esta cantidad de años es diseñada la estructura en general, el diseño estructural comprende que el hormigón se encuentre confinado por el acero de refuerzo, y los esfuerzos que causarían que el hormigón se agriete son tomados por el acero, las grandes edificaciones son debidamente bien diseñadas estructuralmente y no ocurre presencia de grietas bajo condiciones de servicio.

La existencia de micro fisuras en la masa de hormigón no afecta considerablemente el desempeño estructural ni la vida útil promedio de una estructura, pero si es un beneficio proyectando su empleo en la dosificación para obtención de mejores resistencias requeridas.

Según este estudio, los agentes reparadores del hormigón se usan en cantidades de 2% con respecto al peso del cemento, este porcentaje no le permite distribuirse en gran cantidad en toda la masa de hormigón y tendría que usarse grandes dosificaciones en la mezcla, pero

existe un límite del 5% de uso de aditivos para no cambiar la configuración de la mezcla, aun usando un porcentaje mayor al 5% no sería factible económicamente ya que en grandes porcentajes aumentaría considerablemente el precio del hormigón, si se quisiera usar bajos porcentajes en la mezcla debería distribuirse en la estructura solo en las zonas en donde se prevén las grietas o fisuras, pero el tiempo de construcción sería más prolongado y aumentaría costos por manos de obra,

En edificaciones de baja altura de tipo residencial si se da el uso de aditivos en la mezcla de hormigón, generalmente no necesitan cumplir tantos parámetros de calidad comparado con las grandes edificaciones, y la mano de obra no es tan técnica, por lo que se corre el riesgo de un mal uso de estos agentes reparadores, o incertidumbre de su correcta aplicación.

Tanto en obras menores o mayores, el desempeño y vida útil de la estructura dependen de una correcta dosificación del concreto regidos a estándares de calidad, y de un correcto diseño estructural, el uso de agentes reparadores tiende a aumentar la resistencia del hormigón por lo que estaría ligado al campo de la dosificación.

CONCLUSIONES

- El mortero convencional desarrolla una resistencia a los 28 días de 13 MPa, mientras que el mortero con adición del 3%, de Carbonato de Calcio llega a una resistencia de 25 MPa y con añadidura del 2%, de Silicato de Sodio se obtiene una resistencia de 23 MPa; incrementando su eficiencia al 192% y 177% respectivamente.
- Se determina que los dos agentes curadores tienen los siguientes beneficios:
 - a) Eficientes para la auto reparación del mortero, tanto el silicato de sodio como el carbonato de calcio, puesto que, según el estudio realizado, ambos no afectan a las propiedades físicas y mecánicas del hormigón o mortero siempre y cuando sean debidamente dosificadas dentro del límite inferior al 5%.
 - b) Los agentes curadores del hormigón o mortero actúan automáticamente solo en las fisuras de hasta 0.15 mm que atraviesan el encapsulado, las fisuras superiores a 0.15mm y fisuras que no atraviesen el micro encapsulado no serán auto reparadas.
 - c) Intervención del hombre para la corrección de micro fallas es nula, en comparación al uso del mortero convencional, donde se necesita una reparación periódica, análisis en obras, recubrimiento de imperfecciones, que a la larga incrementa el tiempo de obra y factor económico.
- Analizando el uso de encapsulado del mortero se concluye que no garantiza su distribución homogénea en toda la pasta del hormigón, por la baja adición del encapsulado en la mezcla.

RECOMENDACIONES

En este trabajo de titulación se formulan las siguientes Recomendaciones:

- Se recomienda continuar con estudios dedicados a buscar una mayor vida útil a las estructuras de obras civiles, que actúen directamente con los materiales utilizados, en este caso por medio de encapsulados de compuestos químicos, siempre y cuando sean amigables con el medio ambiente, abaratar costos de mantenimiento y cumpliendo con las resistencias diseño.
- Los ensayos realizados con las mezclas donde se incluyen el encapsulado químico y los agentes curadores deben hacerse con estricta precaución en especial en los ensayos de compresión y flexión, donde se debe aplicar las fuerzas hasta la zona elástica.
- Por la dificultad de obtener una mezcla homogénea se recomienda usar este agente solo en los lugares donde se prevé las grietas retardaría el proceso constructivo, en caso contrario si se pretende distribuir grandes cantidades dentro de la masa de concreto para tratar de cubrir toda posible micro fisura alteraría la mezcla y no sería viable económicamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Amaris Martínez, N. A., & Rondón Panqueva, V. (2009). Uso del silicato de sodio como adición natural del concreto hidráulico.
- Beltrán, M. G. S., Ortíz, W. V. M., & Jonkers, H. M. J. A. (2016). Hormigón autoReparable con bacterias y reforzado con fibras naturales: Principios y aplicaciones en Ecuador. *17(3)*, 207-214.
- Cabezas Cantos, N. A., & Valarezo Arciniega, R. N. (2020). *Elaboración de hormigón auto reparable con encapsulado químico*. Quito: UCE,
- Hermida, É. J. C. E. I. A. (2011). *Polímeros*. 17.
- NEC-SE-VIVIENDA. (2015). Vivienda de hasta 2 pisos con luces de hasta 5m. *Direccion de Cmunicacion Social, MIDUVI*.