

**ESTADO DEL ARTE DE TECNOLOGÍAS AUTOREPARANTES EN
CONCRETOS Y PAVIMENTOS.**

Monografía para optar al título profesional de ingeniero civil

Julián Ricardo Acevedo Lemus

Director: Ing. Carlos Eduardo Torres

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS.

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

BOGOTÁ.

2021.

DEDICATORIA

A mis padres, mis hermanos, porque fueron el pilar de apoyo fundamental en el transcurso de mi carrera profesional. A mis profesores, por sus enseñanzas que dejaron bases para desarrollarme como ingeniero civil.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Santo Tomás, por brindarme herramientas importantes para mi formación personal y profesional.

Al Ing. Carlos Torres y al Ing. Juan Miguel Sánchez, por su asesoría y colaboración en la elaboración de esta monografía.

A todas las personas que me brindaron su apoyo a lo largo de mi formación académica.

ÍNDICE

1.	RESUMEN	1
2.	ABSTRACT.....	3
3.	INTRODUCCIÓN	5
4.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	7
5.	OBJETIVOS	8
5.1.	Objetivo general	8
5.2.	Objetivos específicos.....	8
6.	JUSTIFICACIÓN	9
7.	MATERIALES AUTOCURATIVOS	11
7.1.	Concreto autocurativo.....	11
7.1.1.	Proceso natural de autocurado.....	14
7.1.2.	Proceso de autocurado químico.....	16
7.1.2.1.	Agentes curadores	17
7.1.2.1.1.	Resinas epoxi.....	17
7.1.2.1.2.	Cianoacrilatos.....	19
7.1.2.1.3.	Soluciones álcali – sílice	19
7.1.2.2.	Técnicas de almacenamiento.....	22
7.1.2.2.1.	Encapsulación.....	23

7.1.2.2.2.	Pipetas huecas y redes de tubos huecos que contienen pegamento....	23
7.1.3.	Proceso de autocurado biológico.....	26
7.1.3.1.	Precipitación biológica del carbonato de calcio.....	27
7.1.3.2.	Precipitación biológica de silicato polifórmico de hierro – aluminio ...	32
7.1.3.3.	Hongos	33
7.2.	Pavimento autocurativo	33
7.2.1.	Tecnología autocurativa en pavimentos asfálticos.....	35
7.2.1.1.	Nanopartículas.....	36
7.2.1.1.1.	Nanoarcilla	36
7.2.1.1.2.	Nanocaucho.....	36
7.2.1.2.	Calentamiento por inducción	38
7.2.1.3.	Rejuvenecimiento.....	42
7.2.1.4.	Microcapsulas.....	43
8.	COSTOS Y BENEFICIOS	47
8.1.	Concreto autorreparable	47
8.2.	Pavimento autorreparable	49
9.	BENEFICIOS Y DIFICULTADES EN EL ENTORNO COLOMBIANO	51
10.	CONCLUSIONES	53
11.	BIBLIOGRAFÍA	55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Número de publicaciones por año para la búsqueda "concrete healing" (Sidiq, Gravina, & Giustozzi, 2019).....	6
Ilustración 2. Mecanismos de autocuración natural en materiales cementosos (Talaiekhosani, y otros, 2014)	15
Ilustración 3. Cristalización formada en grietas (Homma, Mihashi, & Nishiwaki, 2009)	15
Ilustración 4. Residuo blanco que llena las grietas después del curado claramente observado en la superficie de la muestra (Qian S, 2009).....	16
Ilustración 5. Esquema de vigas. (Ghosh S. K., 2009)	21
Ilustración 6. Daño visual mejorado por el sangrado de tinte fluorescente de fibras de vidrio huecas. (Pang & Bond, 2005).....	24
Ilustración 7. Diagrama esquemático de la red de recipientes o tuberías de fibra de suministro. (Talaiekhosani, y otros, 2014)	25
Ilustración 8. La imagen a es una foto sin ampliación, la foto b está ampliada 20 veces y la foto c esta ampliada 40 veces. (Talaiekhosani, y otros, 2013)	30
Ilustración 9. Foto de un microscopio electrónico de barrido ambiental de precipitación de calcio con ampliación de 20000 veces.....	31
Ilustración 10. Fotos de un microscopio de fluorescencia de la morfología de muestras de bitumen con contenido de microcápsulas variable del 10% (a1, b1, c1,) al 30% (a2, b2, c2) y diámetros variables <10 µm (a1, a2), 20 µm (b1, b2), y 30 µm (c1, c2), (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method, 2014).....	45

Ilustración 11. Ciclo de vida conceptual del concreto estándar (línea A) en comparación con el concreto con capacidad de autocuración (línea B), (Sidiq, Gravina, & Giustozzi, 2019). 48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen principales investigaciones de reparación autógena del concreto (Wu, Johannesson, & Geiker, 2012)	13
Tabla 2. Taxonomía para la investigación en concretos autorreparables (Talaiekhosani, y otros, 2014)	14
Tabla 3. . Agentes testeados en el experimento. (Ghosh S. K., 2009).....	20
Tabla 4. Lista de microorganismos aplicables para el desarrollo de concreto autocurativo basadas en sus respectivos mecanismos autocurativos. (Talaiekhosani, y otros, 2014).....	32

1. RESUMEN

Este documento se llevó a cabo con el objetivo de realizar una revisión del estado del arte y la práctica de tecnologías autoreparantes en concretos y pavimentos existentes, con el fin de establecer las bases para futuras investigaciones. Es relevante mencionar que esta es una investigación cualitativa en donde se hizo la recolección del análisis documental de los diferentes métodos que han surgido para ayudar a concretos y pavimentos a curarse por sí mismos recuperando las propiedades mecánicas del material o incluso mejorándolas. La importancia de conocer estas nuevas tecnologías radica en que los costos por mantenimiento y sus costos derivados son demasiado altos, y se podrían mitigar si los materiales pudieran prolongar su vida útil, curándose microscópicamente para evitar daños macroscópicos que comprometan el desempeño de los materiales en conjunto y de las estructuras en sí.

Esto se puede lograr de diversas formas, distintos autores han desarrollado tecnologías, unas más eficientes que otras, en cuanto al concreto estas tecnologías se pueden agrupar en tres; natural, química y biológica. La natural se debe principalmente por la formación de hidróxido de calcio y carbonato de calcio, la química comprende el curado artificial debido a la inyección de componentes químicos en las grietas de la estructura, estos componentes químicos pueden ir encapsulados o en tubos capilares dentro de la matriz de concreto, y la biológica usa también microcápsulas, pero el agente curativo usado son esporas bacterianas.

En el asfalto existen tres tecnologías, incorporación de nanopartículas, calentamiento por inducción y rejuvenecedores. Las nanopartículas abarcan dos materiales distintos, la nanoarcilla

y el nanocaucho, estos se usan como modificadores para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los aglutinantes ayudando al rendimiento insitu del pavimento asfáltico.

El calentamiento por inducción consiste en aditivos conductores que se puedan calentar y ayuden a la reaglomeración de los componentes del asfalto ayudando a cerrar microgrietas, los principales aditivos usados fueron lana de acero, fibras de acero y fibras de carbono. Y finalmente los rejuvenecedores, estos también se emplearon en microcápsulas que iban en conjunto con la mezcla bituminosa, el propósito de los rejuvenecedores es difundirse en el aglutinante envejecido y ayudar a restaurar la estructura molecular original para extender la vida útil del pavimento.

Al final se puede evidenciar que los costos de inversión iniciales al incluir tecnologías autorreparables son más altos, pero estos se compensan con la extensión de la vida útil de las estructuras, reduciendo costos en mantenimiento y reparación, que si se ponen en contraste con una estructura común se puede lograr entender el beneficio de los pavimentos y concretos que emplean tecnologías autoreparantes.

Palabras clave: Concreto autoreparable, Pavimento autoreparable, Tecnologías autorreparables, Agente curativo, Microgrietas, Microcapsulas, Inducción por calor, Bacteria.

2. ABSTRACT

This document was carried out with the objective of conducting a review of the state of the art and the implementation of self-healing technologies in existing concrete and pavements, in order to establish the bases for future researches. It is relevant to mention that this is a qualitative investigation where a documentary analysis was made of the different methods that have emerged to help concrete and pavements heal themselves, recovering the mechanical properties of the material or even improving them. The importance of knowing these new technologies is that the maintenance costs and their derived costs are too expensive, and could be mitigated if the materials could extend their life - cycle, being cured microscopically to avoid macroscopic damages that compromise the performance of the materials and the structures themselves.

This can be achieved in various ways. Different authors have developed technologies, some more effectively than others. In terms of concrete, these technologies can be grouped into three; natural, chemical and biological. The natural is mainly due to the formation of calcium hydroxide and calcium carbonate, chemical one includes artificial curing due to the injection of chemical components into the cracks of the structure, these chemical components can be either encapsulated in microcapsules or in capillary tubes inside the concrete matrix, and the biological one also uses microcapsules, but the healing agent used is bacterial spores.

In asphalt there are three technologies, incorporation of nanoparticles, induction heating and rejuvenators. Nanoparticles has two different materials, nanoclay and nanorubber, these are used as modifiers to improve the physical and mechanical properties of the binders, helping the in-situ performance of the asphalt pavement.

Induction heating consists of conductive additives that can heat and help re-agglomerate asphalt components helping to close microcracks, the main ones used were steel wool, steel fibers and carbon fibers. And the last one; the rejuvenators, these were also used in microcapsules that went together with the bituminous mixture, the purpose of the rejuvenators is to diffuse into the aged binder and help restore the original molecular structure to extend the life - cycle of the pavement.

In the end, it can be seen that the initial investment costs by including self-repairing technologies are higher, but these are offset by the extension of the useful life of the structures, reducing maintenance and repair costs, which if it is contrasted with a regular structure, it is possible to understand the benefit of pavements and concretes that use self-healing technologies.

Keywords: Self-healing concrete, Self-healing pavement, Self-healing technologies, Healing agent, Microcracks, Microcapsules, Induction heating, Bacteria.

3. INTRODUCCIÓN

En 2017 una recopilación de la información de la producción de cemento en los países que más fabrican cemento fue de 4,6 billones de toneladas métricas, China como pionera con un 71,9%, seguida por India con un 8,4%, luego Estados Unidos con un 2,5% y Australia con un 0,21% (1,2). La red mundial de carreteras se extiende por 16,3 millones de kilómetros (Tabakovic & Schlangen, 2015), de los cuales 5 millones de kilómetros se encuentran en la Unión Europea, 4,4 millones de kilómetros en Estados Unidos y 3,1 millones en China (Garside, 2021).

En 2009 los gobiernos de la UE invirtieron 4,5 billones de euros, el equivalente al 42% del fondo de la red de transporte de la UE (10,74 billones de euros) en el desarrollo y mantenimiento de las carreteras de toda la UE. Además en general la UE gasta casi el 50% del presupuesto anual de obras de ingeniería civil en mantenimiento, mejora y reparación (European Union Road Federation, 2012).

Estas cifras dejan dos aspectos a destacar, el primero es que el concreto y el asfalto son materiales de alta demanda debido a que su implementación en obras civiles es fundamental para el crecimiento y la competitividad de la economía a nivel mundial. Y el segundo, es que los gobiernos de los países invierten sumas de dinero grandes en mantenimiento y desarrollo de las obras civiles. Si la vida útil de los materiales se puede extender se podría lograr reducir significativamente la actividad de mantenimiento de obras civiles. Sin embargo, la mayoría de las tecnologías autoreparables sigue en desarrollo, como tal los materiales autorreparables se situaron como campo de estudio en 2007 (Delft University Technology, 2007), como lo muestra la imagen 1 a partir de aquí las publicaciones acerca de tecnologías autoreparantes comenzaron a diversificarse y surgieron múltiples propuestas y formas de implementar estos materiales en los

concretos y asfaltos. Por lo que se vuelve importante conocer estas tecnologías, saber si ya han sido probadas insitu y lo que se espera a futuro de ellas para mejorar y corregir.

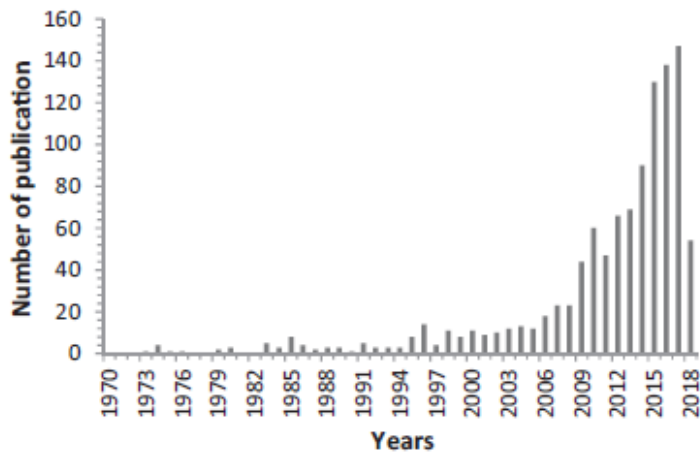


Ilustración 1. Número de publicaciones por año para la búsqueda "concrete healing" (Sidiq, Gravina, & Giustozzi, 2019).

4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El deterioro de los materiales con el paso del tiempo en obras civiles genera la necesidad de invertir en mantenimiento, la frecuencia de este varía en los materiales usados para hacer las mezclas, su correcta elaboración, manejo, puesta en obra, entre muchos otros factores. El mantenimiento de las obras civiles puede ser muy costoso, y una de las finalidades de un ingeniero civil es realizar las obras con los menores recursos posibles cumpliendo con todos los requerimientos y normativas exigidas. En Colombia hay casos en los que el deterioro de los materiales han jugado un papel importante en sobre costo de las obras, como el de las losas de Transmilenio en donde se cambiaron los diseños principales, CEMEX y Asocreto tuvieron un papel determinante para modificar los diseños de la obra con el fin de que se terminara comprando relleno fluido -un material usado para tráfico liviano, como paraderos- para terminarlo usando en los carriles principales del sistema masivo (Semana, 2017), y según el IDU los corredores viales que más presentan losas en mal estado son 3.771 losas en Autopista Norte, 1.863 losas en Av. NQS, 975 losas en Troncal Av. Suba, 535 losas en Troncal Av. Caracas Sur y el Distrito ha destinado 34.000 millones de inversión frente a una necesidad de 287.000 millones para el arreglo total de las losas de Trasmilenio (RCN radio, 2018). Así mismo como este problema se presentan muchos otros en la ciudad de Bogotá y a nivel nacional, se ha vuelto común transitar por las carreteras del país y verlas deterioradas, suponiendo que la calidad de los materiales de construcción de las obras son las deseadas, es decir dejando de lado los problemas en donde se reemplazan los materiales por otros de menor calidad para aminorar precios, se pueden buscar alternativas para que estos materiales tengan una mayor vida útil y no haya que invertir o se invierta menos en gastos de mantenimiento, por esto nace la necesidad de investigar en estos materiales autoreparables, para que cumplan con la necesidad de los problemas actuales en el país.

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo general

- Realizar una revisión del estado del arte y la práctica de las tecnologías autoreparantes en concretos y pavimentos existentes, con el fin de establecer las bases para futuras investigaciones.

5.2. Objetivos específicos

- Realizar un estudio del estado del arte de las técnicas de autoreparación de pavimentos y concretos en bases de datos, repositorios institucionales y demás fuentes de divulgación científica.
- Analizar las características principales de las múltiples técnicas de autoreparación en concretos y pavimentos.
- Establecer mediante comparación los beneficios y las dificultades que supone la aplicación de las técnicas en el entorno colombiano.

6. JUSTIFICACIÓN

Debido a la gran demanda de pavimentos y concretos en la construcción de obras civiles, estos materiales compuestos son trascendentales en casi la totalidad de las ciudades alrededor del mundo. Cada material usado para la construcción de estructuras de pavimento posee una vida útil dependiendo en qué estructura estén empleados, las características climatológicas en donde se usaron para construir, un diseño de acuerdo a las características de la obra, o la correcta elaboración del mismo, entre muchos otros.

En Colombia hay problemas en las obras civiles del país como los pavimentos rígidos que necesitan de constante mantenimiento en los corredores viales de Transmilenio (La República, 2014), la demolición del edificio Space en Medellín (El Espectador, 2014) y los problemas de los puentes Hisgaura y Chirajara (Semana, 2018) entre otros, es evidente la problemática que se genera en torno a los costos generados por mantenimiento, demolición y costos derivados en obras civiles en Colombia, la posibilidad de estudiar materiales con capacidad de autoregenerarse podría dar un camino que lleve a la ingeniería civil colombiana a no cometer los mismos errores. Los ingenieros civiles a nivel mundial están buscando formas de mitigar el deterioro de estos materiales debido a su uso con el paso del tiempo con el fin de conseguir el máximo provecho de las obras civiles con la menor cantidad de recursos posibles, es por esto que nacen las metodologías autoreparantes, originadas como campo de estudio en 2007 (Delft University Technology, 2007) y profundizadas en la Universidad Tecnológica de Delft en Países Bajos, estas ideas tienen un alto potencial para la ingeniería civil a nivel mundial, posiblemente en un futuro cuando estos materiales ya hayan sido implementados se convertirán en el eje principal de las obras civiles.

Por este motivo es importante conocer el avance que estos materiales han tenido en los últimos años, cómo funcionan, cuáles son sus propiedades mecánicas y hasta qué punto se han desarrollado e implementado en la actualidad. Investigar temas poco conocidos que pueden tener gran relevancia en un futuro es la razón por la cual quiero realizar esta monografía, dejando bases para que este tema sea investigado y si es posible implementado a nivel nacional.

7. MATERIALES AUTOCURATIVOS

Se han usado varios términos para referirse a este tipo de materiales como autocuración, autoreparación, curación autónoma, curación automática, autotratamiento, bioconcreto (concretos autocurativos), hormigón biológico (concretos autocurativos), entre otros, sin embargo nos referiremos a estos como autocurativos o autoreparantes.

La autocuración es la capacidad que tiene un material para reparar, recuperar o curar deterioros, daños o desperfectos de forma automática y autónoma, es decir, sin ninguna intervención externa. La inclusión de las propiedades de autocuración en materiales hechos por el hombre generalmente no puede realizar la acción de autocuración sin un disparador externo. (Swapan Kumar Ghosh, 2009)

En consecuencia, hay dos tipos de autocuración:

- Autónoma (sin ninguna intervención)
- No autónoma (necesita intervención humana o un disparador externo)

Los materiales autocurativos fueron implementados como objeto de estudio oficialmente en 2007, luego de la International Conference of Self Healing Materials realizada en Noordwijk, Países Bajos (Delft University of Technology, 2007). De estas conferencias que se desarrollan anualmente se destacan dos universidades en el campo de concretos y concretos asfálticos, Delft University of Technology y Cardiff University, investigaciones de las cuales se puede sacar la información más relevante en este campo de estudio.

7.1. Concreto autocurativo

Los primeros indicios de autocuración autónoma en concreto se observaron en estructuras romanas antiguas, en donde se evidenció fisuración que pareciera haber sido sellada,

esto se debe a los componentes del concreto romano, su mortero, principalmente a base de cal, interactuó con otros químicos en la mezcla y fue reemplazada por cristales de un mineral de aluminosilicato de calcio. Estos cristales crecen en la matriz cementosa del material, incluidas las zonas donde las grietas tienden a desarrollarse. Esta formación continua de cristales mantiene unidos el mortero y el agregado grueso, contrarrestando la formación de grietas y dando como resultado un material que ha durado 1.900 años. (Hartnett, 2014).

No obstante, la idea del autocurado fue inspirada en fenómenos naturales de organismos como árboles y animales. Debido a que la piel y corteza de estos puede ser reparada de manera autónoma (Ghosh S. K., 2009)

El concreto es un material relativamente frágil con una gran resistencia a la compresión pero baja a tensión. Para contrarrestar esta limitación se utiliza acero para reforzar el concreto debido a su alta resistencia a la tensión. Hoy en día se utiliza el concreto preesforzado debido a que es una buena manera de combinar aceros y concretos de alta resistencia, este tipo de construcción permite la utilización efectiva de materiales de alta resistencia, gracias a esto se ha extendido significativamente el rango de luces posibles del concreto estructural y los tipos de estructuras para los cuales es adecuado, esto se debe a que si el concreto no está precomprimido el concreto de un elemento a flexión se agrietará en la zona de tensión, por lo que el preesfuerzo reduce de manera significativa las deflexiones y las grietas de flexión para cargas normales, y de esta manera permite la utilización efectiva de materiales de alta resistencia. (Nilson, 2001)

El concreto es un material excelente para resistir carga a compresión hasta cierto límite, pero si esta carga aplicada sobre él es mayor que su límite de carga máxima, provoca disminución en la resistencia del concreto debido a que se producirán fisuras en él, la reparación de estas fisuras puede resultar muy costosa. Si no se hace esta reparación la permeabilidad del

concreto aumentará y otras propiedades como la durabilidad y la resistencia de la estructura también disminuirán. Debido al aumento de la permeabilidad el agua puede atravesar fácilmente el concreto y entrar en contacto con los refuerzos de acero, después de un tiempo comienza a corroerse el refuerzo por lo que la resistencia del concreto disminuirá y será necesario reparar las grietas. (Luhar, 2015)

Si comienzan a surgir microfisuras y estas se comienzan a reparar por si mismas se podrán prevenir macrofisuras o posteriormente grietas, previniendo la disminución de la resistencia de la estructura y la conservación de las propiedades del concreto, además ahorrando costos de mantenimiento.

En un artículo publicado en 2012 Min Wu, Björn Johannesson y Mette Geiker nombraron los estudios con los cuales se inició el campo de investigación del concreto autocurativo, a continuación un cuadro resumen en donde se presentan las primeras investigaciones en curación autógena del concreto.

ESTUDIO	AUTORES	PERIODO
Autocuración de grietas en hormigón fracturado en estructuras de retención de agua	Academia Francesa de Ciencias	1836
Fenómeno de la autocuración	Hyde y Smith	1889
Distinción entre autocuración y autosellado	Glanville	1926
Autocuración de muestras de hormigón expuestas a ciclos de congelación - descongelación	Jacobsen y Sellevols	1997
Autocuración de grietas con fugas	Clear, Hearn y Edvardsen	1997

Tabla 1. Resumen principales investigaciones de reparación autógena del concreto (Wu, Johannesson, & Geiker, 2012)

En los años 1980 los artículos de investigación sobre autocuración del concreto fueron muy escasos, no fue sino hasta los años 1990 en donde comienzan a surgir estudios más centrados en este campo de investigación, existen varios procesos para el autocurado del concreto, los cuales se pueden dividir prácticamente en tres principales, químico, natural y biológico.

En el esquema se pueden observar los distintos mecanismos de autocurado para concreto en para cada proceso.

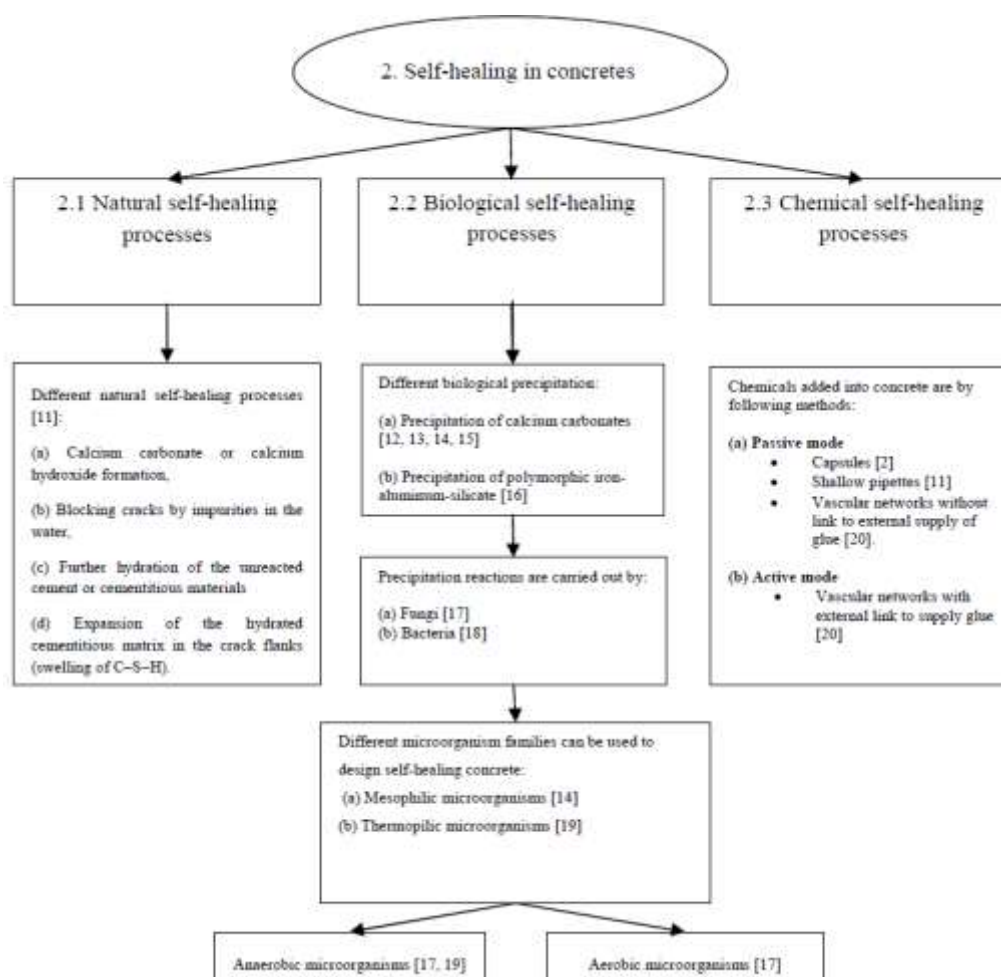


Tabla 2. Taxonomía para la investigación en concretos autorreparables (Talaiekhosani, y otros, 2014)

7.1.1. Proceso natural de autocurado

Se puede decir que hay cuatro principales causas del fenómeno de autocurado en concreto, a) formación de carbonato de calcio o hidróxido de calcio, b) el bloqueo de las grietas por impurezas en el agua y el concreto suelto, c) hidratación adicional del cemento sin reaccionar o materiales cementosos y d) la expansión de la matriz cementosa hidratada en la fisura.

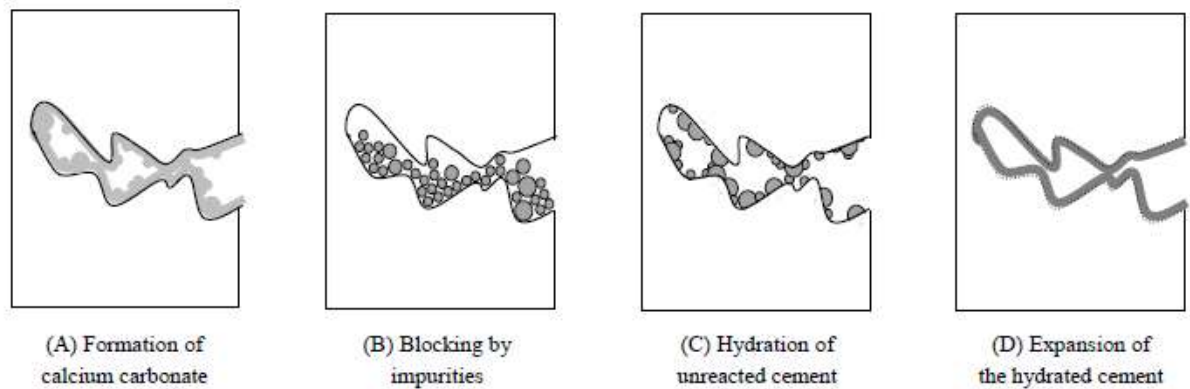


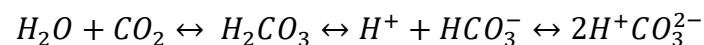
Ilustración 2. Mecanismos de autocuración natural en materiales cementosos (Talaiekhzani, y otros, 2014)

La mayoría de estos mecanismos solo llenan parcialmente la fisura, pero previenen la entrada de agentes químicos y posterior ampliación de las fisuras. El mecanismo más efectivo es la formación de carbonato de calcio o hidróxido de calcio.



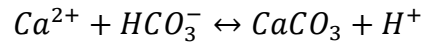
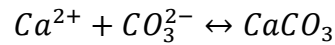
Ilustración 3. Cristalización formada en grietas (Homma, Mihashi, & Nishiwaki, 2009)

El proceso es brevemente explicado por las siguientes ecuaciones, en primera instancia el dióxido de carbono se disuelve en agua.



Luego los iones libres de calcio son liberados como consecuencia de la hidratación y se dispersan a través del concreto y de las fisuras, reacciona con el carbonato y el bicarbonato.

Como resultado se forman cristales de carbonato de calcio. Estas reacciones solo pueden ocurrir cuando el PH del agua está por encima de 8 o dentro de 7.5 y 8, los cristales se forman y llenan los vacíos.



La hidratación del cemento sin reaccionar se debe principalmente a las propiedades del mismo, sin embargo este proceso solo aplica para el concreto en edades tempranas y el proceso que provoca la autocuración es la formación de carbonato de calcio en edades posteriores, la autocuración natural funciona en grietas con anchos de hasta 0,1 – 0,2 mm (Zwaag v. d., 2007)



Ilustración 4. Residuo blanco que llena las grietas después del curado claramente observado en la superficie de la muestra (Qian, y otros, 2009)

7.1.2. Proceso de autocurado químico

El proceso químico consiste en el curado artificial debido a la inyección de componentes químicos en las grietas de la estructura. Este se puede dividir en dos. Pasivo, en el cual podemos encontrar cápsulas, pipetas o fibras pequeñas y redes vasculares sin conexión al suministro

exterior de adhesivo. Y activo, en el cual tenemos redes vasculares con conexión al suministro exterior de adhesivo.

Básicamente este método utiliza pequeños recipientes cargados de agentes químicos que sirven como adhesivo o pegamento para que el concreto se pueda curar una vez comience a fracturarse. Es relevante conocer los tipos de agentes curativos y también los diferentes métodos de almacenamiento del agente.

7.1.2.1. Agentes curadores

Un agente adecuado para un curado autonómico de materiales cementosos debe poseer las siguientes características:

- Tener la capacidad de ser fácilmente encapsulable.
- Tener la circulación o fluidez suficiente para alcanzar la ubicación de las fracturas después de liberado.
- Tener las propiedades mecánicas suficientes postcurado para resistir la apertura de grietas.
- Tener suficiente durabilidad a largo plazo y compatibilidad con la matriz cementosa.

Dentro de los agentes curativos que han examinado los distintos autores se pueden encontrar resinas epoxi, cianoacrilatos y soluciones alquisilica.

7.1.2.1.1. Resinas epoxi

Las resinas epoxi se usan en la remediación activa posterior al daño de pisos de concreto en cubiertas y puentes. El Sikadur 52 y Tecroc Epoxy Injection Grout tienen viscosidades a temperatura ambiente (20°C) de 500 y 200 cPs respectivamente.

Estas resinas son materiales duraderos que generalmente tienen buena resistencia térmica, a la humedad y a la luz. Se encuentran en sistemas de una o dos partes: una epoxi de una parte se activa por la presencia de calor y una epoxi de dos partes se cura con la presencia de un endurecedor y un componente de resina (Ghosh S. K., 2009).

Como se verá en la siguiente sección aquí hay algunos ejemplos de autores que usados resinas epoxi de una y dos partes. Nishiwaki diseñó y desarrolló un sistema de autocuración a base de un agente único de resina epoxi de concreto. Donde la resina epoxi se almacena en una película orgánica (etilvinilacetato) que se funde a 93°C, básicamente se usa un sensor que cuando se forma la grieta, este detecta el aumento de la deformación a través de la reducción de la conductividad eléctrica aumentando la resistencia y generando calor, fundiendo el tubo de suministro orgánico y curando la resina epoxi después de que ha fluido por la grieta (Nishiwaki, Mihashi, Jang, & Miura, Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack, 2006).

En cuanto a las resinas epoxi de dos componentes, el problema principal para su aplicación en concreto autocurativo radica en que ambos componentes deben estar presentes en simultaneo en la grieta. Debido a que ambos líquidos deben encapsularse, la probabilidad de que ambas cápsulas estén presentes en el lugar de la grieta y se agrieten al mismo tiempo es demasiado pequeña.

Mihashi intentó darle solución colocando manualmente los dos componentes en tubos adyacentes se evidenció un comportamiento mecánico deficiente debido a la mezcla insuficiente de los fluidos a pesar de que ambos tubos se rompieron y liberaron sus componentes respectivos (H. Mihashi, 2000).

7.1.2.1.2. *Cianoacrilatos*

Los cianoacrilatos (o súper pegamentos) son sistemas de un solo componente que reaccionan a la presencia de humedad y son conocidos por su capacidad de curar rápidamente en orden de segundos a minutos. Proporcionan fuerza de adherencia mayor a la resistencia del concreto. Una característica a destacar es su baja viscosidad (<10cPs), gracias a esto pueden curar grietas de menos de 100 µm de espesor.

Li estudió la eficacia de un cianoacrilato de etilo como agente curativo y observó el aumento de la rigidez inicial en la mayoría de muestras (Li, Lim, & Chan, 1998).

Otra propiedad importante de este material y sobre todo por su relación con el concreto es que son soluciones ácidas. Cuando hacen contacto ambos materiales, dará como resultado la neutralización del pegamento debido a que el concreto es un material alcalino, esto se traducirá en tiempos de fraguado más rápidos. Esta ágil ganancia de fuerza de adherencia puede ser beneficiosa en condiciones de carga cíclica; sin embargo si el tiempo de fraguado es más rápido, la dispersión del agente curativo puede ser insuficiente. (WILEY-VCH, 2009)

7.1.2.1.3. *Soluciones álcali – sílice*

Mihashi estudió el uso de una solución álcali – sílice diluida y sin diluir como agente curativo. Esta solución causa hidratación en presencia de oxígeno, uniendo las caras de la grieta. La fuerza de adherencia es menor que la del pegamento, aunque esto es irrelevante si la fuerza de adhesión es mayor que la resistencia a tracción del material circundante (H. Mihashi, 2000).

El uso de soluciones álcali – sílice como material curativo en concreto es probable que cause menos problemas de compatibilidad que sus contrapartes a base de polímeros (WILEY-VCH, 2009).

En 2009 fue publicada la investigación del Centro de Materiales de Delf, llevada a cabo por la Universidad tecnológica de Delf en el libro Materiales Autocurativos (WILEY-VCH, 2009) en donde analizaron distintos tipos de agentes y se analizaron otras variables para comprobar la viabilidad del concepto autocurativo.

En esa investigación en la etapa preliminar se examinaron dos tipos de cianoacrilatos y un tipo de resina epoxica.

AGENTE CURATIVO	RESINAS EPÓXICAS DE BAJA VISCOSIDAD	CIANOACRILATO
TIPO	TECROC TC07	RITE LOK EC- 5
¿SIRVE PARA ENCAPSULACIÓN INTERNA?	INADECUADO	ADECUADO
RAZÓN	A pesar del curado de la resina y de que continuaba sellando se observó que continuaba dentro del tubo capilar.	Gracias a su baja viscosidad fluye fácilmente (1 - 10 cPs), en presencia de humedad comienza a curar rápidamente de segundos a minutos.

Tabla 3. . Agentes testeados en el experimento. (WILEY-VCH, 2009)

La resina epoxica tiene una viscosidad de 200 CPS a temperatura ambiente por lo que solo es capaz de rellenar grietas de menos de 100 μm . Según los autores determinaron que ese método ofrece propiedades pobres de curación debido al insuficiente mezclado de los componentes, por lo que esta opción fue descartada de la siguiente etapa.

Por otro lado los cianoacrilatos fluyen fácilmente gracias a su baja viscosidad 1-10 CPS, en presencia de humedad comienza a curar rápidamente.

Una vez descartadas las resinas epoxicas se usó cianoacrilato en la siguiente fase, donde básicamente usaron vigas prismáticas a escala pequeña de 255x75x75mm, estas fueron reforzadas con una barra de 3,15mm de diámetro para controlar el desarrollo de la fractura y también para permitir la suficiente apertura para que el agente adhesivo curante entre a la fractura antes de sanar. Se usaron 6 vigas, 4 vigas autocurativas (SH) y dos vigas de control (C). En las vigas se fundieron cuatro tubos y posteriormente tubos plásticos de abastecimiento fueron

acoplados al final de cada tubo. Se realizó la prueba de flexión en tres puntos, las vigas SH fueron cargadas más allá del punto de pronunciación de la primera fractura y luego hasta un desplazamiento de apertura de la boca de la fisura de aproximadamente 0,55 mm, luego la carga fue removida y se dejaron sanar las vigas completamente 24 horas antes de ser puestas de nuevo hasta fallar. Las vigas de control fueron falladas normalmente sin el proceso de curado debido a que es innecesario.

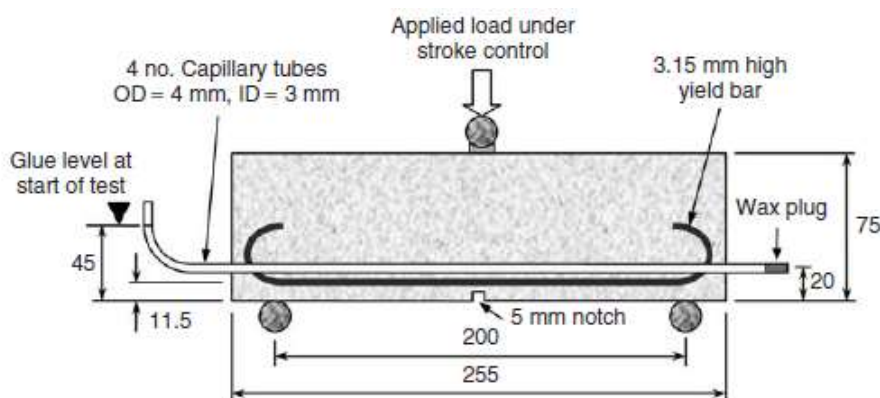


Ilustración 5. Esquema de vigas. (WILEY-VCH, 2009)

Mediante el análisis de gráficos en donde se mostraba la deflexión central y la respuesta carga - CM OD (desplazamiento de la apertura de la boca de la fisura) los autores concluyeron factores importantes en cuanto a autocurado se refiere, se puede destacar que:

- Tres de las cuatro vigas SH mostraron evidencia significativa de autocurado.
- Se observó un curado “primario” durante el primer ensayo de las vigas SH, según los investigadores esto se debe a que los cianoacrilatos son soluciones acidas que pueden curar en segundos incluso en presencia de humedad y ambiente alcalino.

- Hay evidencia clara de un curado “secundario” al comparar la respuesta mecánica de las vigas SH con las vigas C.
- No solo hay un efecto de autocurado, sino también de automejorado, debido a que si se compara la respuesta mecánica de las cuatro vigas SH probadas después de un periodo de veinticuatro horas con las vigas C el pico ha incrementado un veinte por ciento y el postpico es más dúctil.

Este estudio sirvió para sentar las bases de qué agentes curadores son ideales para implementar en el concreto autocurativo, en esta instancia se puede decir que los cianoacrilatos son adecuados para implementarse.

7.1.2.2. Técnicas de almacenamiento

- Encapsulación.
- Pipetas huecas y redes de tubos huecos que contienen pegamento.

Se han propuesto diversas técnicas de encapsulación en la literatura, Mihashi y Li describen las dos técnicas de almacenamiento de agentes curativos primarias, la primera, microcápsulas que encierran un agente reparador que se incrusta en el concreto (H. Mihashi, 2000). La segunda, cianoacrilato encerrado en tubos capilares sellados con silicona (Li, Lim, & Chan, 1998). La forma de las microcápsulas es un factor a considerar, pues una forma esférica proporcionará una liberación más controlada y mejorada del agente curativo después del agrietamiento. Aunque la liberación potencial del agente curativo después del agrietamiento se reduciría debido a la posible producción de múltiples grietas localizadas, contrarestando la distribución eficiente del agente curativo (WILEY-VCH, 2009).

7.1.2.2.1. Encapsulación

Esta técnica es una de las más comunes para suministrar agente curativo, existen diferentes eficiencias de curación en esta metodología debido a que las capsulas implementadas en diversas investigaciones fueron hechas de diversos materiales. White introdujo la aplicación de microcápsulas que contenían pegamento para el diseño de concreto autocurativo (White, y otros, 2001). Microcápsulas que contenían resina epóxica como pegamento y resina acrílica como endurecedor se usaron por Nishiwaki para investigar materiales mejorados en concretos autocurativos, se realizaron ensayos de resistencia a tracción indirecta o splitting test y ensayo a compresión, los resultados reflejaron tres problemas: 1) el sistema de dos agentes curativos es muy difícil, 2) una muy pequeña cantidad de agente curativo puede ser llenado en una microcápsula, 3) La fuerza de adhesión entre las microcápsulas y la matriz cementosa tenía que ser mayor que la fuerza de las microcápsulas. Para solucionar estos problemas Nishiwaki dijo: 1) uno de los dos agentes curativos puede ser usado como material de base, 2) el diámetro de la microcápsula debe ser lo suficientemente grande, 3) debe mejorarse adhesión entre el material de la cascara de la capsula y la matriz cementosa. En conclusión se dijo que habían demasiados problemas técnicos (Nishiwaki C. , 1997). Según Homma hizo un estudio en concreto autocurativo que contenía microcápsulas, cargó una muestra de concreto hasta casi romperse, los resultados arrojaron que el concreto autorreparable pudo recuperar el 26% de su resistencia original en comparación con la muestra de control que recuperó el 10%, en este estudio se concluyó que la cantidad de pegamento puede aumentar la tasa de recuperación de resistencia del concreto autocurativo (Homma, Mihashi, & Nishiwaki, 2009).

7.1.2.2.2. Pipetas huecas y redes de tubos huecos que contienen pegamento

Las pipetas huecas han sido implementadas por diversos autores, por lo cual hay distintos tamaños, estas pipetas contienen pegamento y se pueden mezclar con el concreto fresco, luego

una vez se produzca la grieta el pegamento será liberado en las fisuras y curará la grieta, este mecanismo fue inspirado en los vasos sanguíneos de los humanos y animales.

Pang y Bond usaron pipetas y monitorearon el patrón de distribución del pegamento cuando se liberaba la mezcla de pegamento y tinte fluorescente (Pang & Bond, 2005).

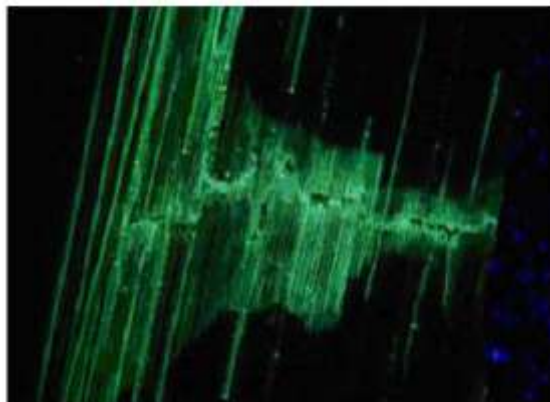


Ilustración 6. Daño visual mejorado por el sangrado de tinte fluorescente de fibras de vidrio huecas. (J.W.C. Pang, 2005)

Dry utilizó una red de recipientes dentro de una mezcla de concreto, esta red consistía en dos tubos de fibra con polipropileno en una matriz de concreto, el sistema consistía en hacer funcionar una bomba de vacío, usó metacrilato de metilo como agente curativo que se introdujo en el concreto a través de los tubos de fibra. Todo esto para estudiar la curación de grietas y reducción de la permeabilidad, esta red era frágil, un extremo iba conectado a un suministro de pegamento y el otro estaba sellado, Mihashi y Joseph hicieron investigaciones similares (Dry, 1994), (H. Mihashi, 2000), (Joseph, Jefferson, & Cantoni, Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials , 2007).

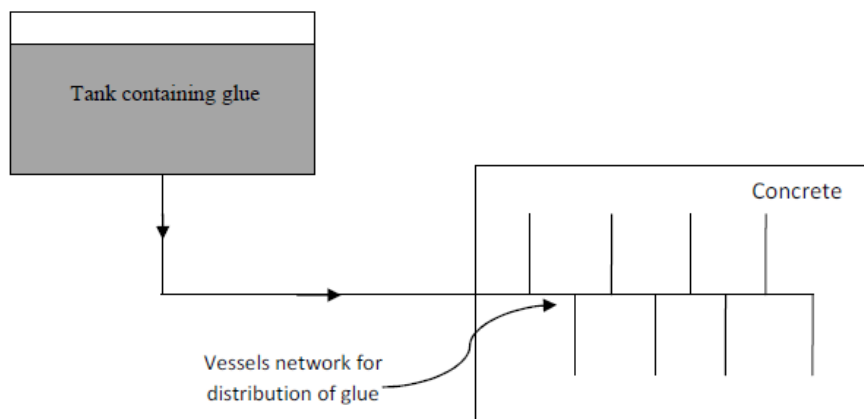


Ilustración 7. Diagrama esquemático de la red de recipientes o tuberías de fibra de suministro. (Amirreza Talaiekhazan, 2014)

Otro estudio en donde se implementó concreto con pipetas huecas y se ensayó a flexión demostró que este concreto puede soportar hasta un 20% más de carga en una prueba a flexión posterior (Homma, Mihashi, & Nishiwaki, 2009).

Joseph utilizó cianoacrilato como agente curativo y un tubo de vidrio de borosilacato para distribuirlo a través del concreto, el agente curativo se suministró por fuerza gravitacional (Joseph C. , Jefferson, Isaacs, Lark, & Gardner, 2010).

Nishiwaki propuso un sistema vascular que puede reparar grietas sin intervención humana, instalando una corriente eléctrica en tuberías de película orgánica que contenían agente curativo, cuando hay agrietamiento la ruta conductora de corriente se reduce y la resistencia eléctrica aumenta, esta va calentando la grieta, derritiendo el tubo de película orgánica y liberando el agente curativo (Nishiwaki, Mihashi, Jang, & Miura, Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack, 2006).

Sangadji and Schlangen propusieron un sistema vascular que consiste en una red porosa de concreto en el centro de una muestra de concreto, se instalan microcontroladores en el

concreto y cuando aparecen grietas se activa una bomba que libera el agente en el concreto poroso y en las grietas (Sangadji & Schlangen, 2011).

7.1.3. *Proceso de autocurado biológico*

El uso de microorganismos en el concreto autocurativo se ha tomado como estrategia por diversos autores. Gollapudi introdujo el concreto biológico autocurativo como alternativa respetuosa con el medio ambiente. Los microorganismos se dividen en 3 categorías importantes: bacterias, hongos y virus, en el proceso autocurativo del concreto los hongos y las bacterias pueden ser usados (U. K. Gollapudi, 1995)

Entre estos microorganismos se utilizan cepas capaces de precipitar determinados productos químicos para diseñar concreto biológico. La precipitación de silicato polifórmico de hierro – aluminio $((Fe_5Al_3)(SiAl)O_{10}(OH)_5)$ y el carbonato de calcio $(CaCO_3)$ son los procesos fundamentales usados en concretos biológicos autoreparables. (Talaiekhosani, y otros, 2014)

Existen distintos métodos para añadir microorganismos al concreto (Wu, Johannesson, & Geiker, 2012), (Toohey, Sottos, Lewis, Moore, & White, 2007), (Wang, Tittelboom, Belie, & Verstraete, 2012):

- Adición en forma de esporas.
- Adición de “caldo” microbiano.
- Forma inmovilizadora sobre gel de sílice o carbón activado.
- Forma encapsulada.
- Utilizando redes vasculares como en el método químico.

Se usa una forma resistente de bacteria (espora) en lugar de usar caldo microbiano, debido a que el pH, el contenido de humedad y la temperatura no son adecuados para el crecimiento de bacterias. Otra alternativa son los microorganismos encapsulados para contrarrestar las duras condiciones del concreto. Sin embargo encapsular microorganismos es un proceso caro y complejo. También se pueden usar redes vasculares para distribuir el caldo microbiano por la estructura de concreto, pero estos métodos están sujetos a la inexistencia o deficiencia de la capacidad de constructibilidad con la tecnología actual. La alternativa de microorganismos inmovilizados sobre gel de sílice o carbón activado es conveniente en términos económicos, sin embargo el efecto del uso de este material en los refuerzos de acero no está claro. (Talaiekhosani, y otros, 2014)

Jonkers demostró que la aplicación de $6 \times 10^8 / \text{cm}^3$ de esporas bacterianas causó una disminución en la resistencia en menos del 10% para muestras curadas de 3, 7 y 28 días. Este estudio demostró que los efectos de las bacterias sobre la firmeza del concreto no son considerables, de todos modos puede ser eficaz para reparar grietas y extender la durabilidad del concreto (Jonkers, Thijssen, Muyzer, Copuroglu, & Schlangen, 2010).

7.1.3.1. Precipitación biológica del carbonato de calcio

Las bacterias seleccionadas deben poseer alta resistencia a una temperatura y pH elevados, y a una limitación importante de agua, esto debido a que el concreto fresco suele tener un pH entre 10 y 13, y su temperatura puede llegar a 70°C, además después de que se ha secado el agua es limitada y no es suficiente. Ghosh y Mandal utilizaron con éxito bacterias termófilas para diseñar concreto autocurativo (Ghosh & Mandal, 2006).

El carbonato de calcio se puede encontrar en forma de tres cristales minerales precipitados, calcita, aragonita y vaterita. La calcita es la adecuada para el desarrollo del concreto autocurativo. Hay factores a tener en cuenta que afectan la calcita biológica:

- 1) Concentración del contenido de carbono orgánico disuelto.
- 2) pH.
- 3) Concentración de iones de calcio (Ca^{+2}).
- 4) Presencia de sitios de nucleación.

Los metabolismos microbianos pueden proporcionar los primeros tres factores y la pared celular actúa como como sitio de nucleación (Li & Yang, 2007).

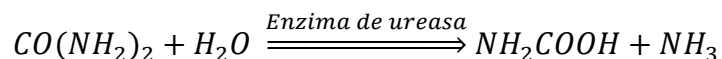
Varias rutas metabólicas microbianas pueden contribuir a la precipitación de minerales biológicos (Castainer, Le, & Perthuisot, 2000), (Riding, 2000), como en el caso de la precipitación del carbonato de calcio:

- Oxidación anaeróbica de sulfuros.
- Amonificación.
- Desnitrificación.
- Reducción de sulfatos.
- Fotosíntesis.

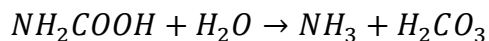
La función de las bacterias para precipitar el carbonato de calcio es su capacidad para aumentar el pH del medio a través de metabolismos bacterianos (Douglas & Beveridge, 1998). Una de las formas más importantes para realizar precipitación biológica de carbonato de calcio es usando bacterias ureolíticas. Estas bacterias producen la enzima ureasa extracelular. La hidrólisis de urea puede ser catalizada por la enzima ureasa. El amoníaco hidrolizado y el

dióxido de carbono aumentan el pH y la concentración de carbonato en el ambiente bacteriano respectivamente. Una serie de reacciones bioquímicas toman lugar para formar carbonato de calcio (Wu, Johannesson, & Geiker, 2012).

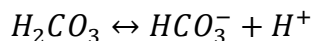
La siguiente ecuación demuestra la hidrolización a carbamato y amoniaco en presencia de ureasa.



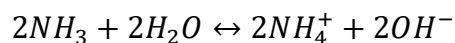
El carbamato se hidroliza formando amoniaco y ácido carbónico.



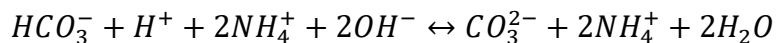
El ácido carbónico se hidroliza formando iones de hidrógeno y carbono.



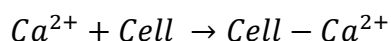
Y el amoniaco también se hidroliza para formar iones de hidróxido y amonio.



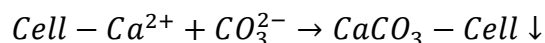
La reacción anterior produce continuamente iones de hidróxido, lo que aumenta el pH, encaminando el equilibrio del ion de bicarbonato hacia la formación de iones de carbonato.



La pared celular bacteriana tiene carga negativa lo que le permite atraer iones positivos de calcio y depositarlos en la superficie de la pared celular.



Los iones de calcio reaccionan con el monóxido de carbono lo que lleva a la precipitación del carbonato de calcio en la superficie celular. Esta precipitación sirve como sitio de nucleación.



Basado en la vía microbiana para la precipitación de carbonato de calcio, la urea tiene que estar presente en el concreto autocurativo para iniciar las reacciones bioquímicas necesarias (Talaiekhosani, y otros, 2014).

La precipitación biológica de calcita puede ser detectada por difracción de rayos x (XRD) y estos cristales también pueden ser observados mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) (Ramachandran, Ramakrishnan, & Bang, 2001).

Talaiekhosani realizó un estudio mediante el aislamiento de microorganismos del suelo, estos podían ayudar en el proceso de curación del concreto después de un mes de observación.

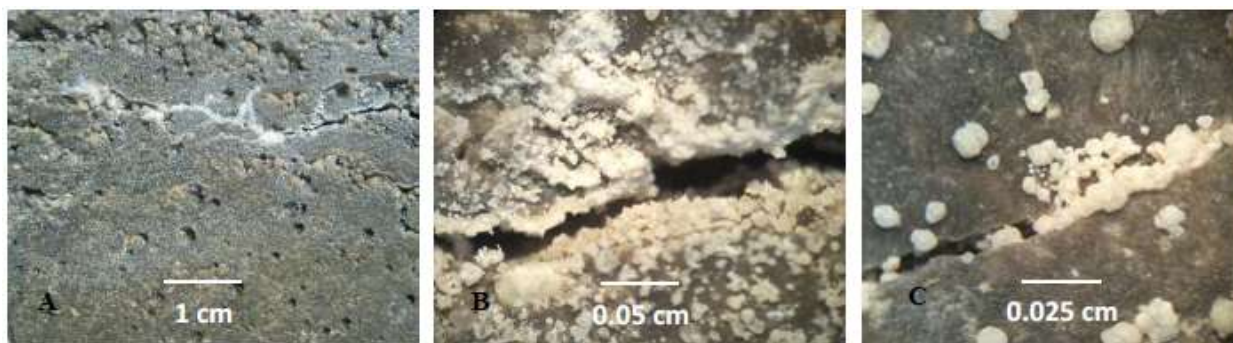


Ilustración 8. Imagen 7. La imagen a es una foto sin amplificación, la foto b está amplificada 20 veces y la foto c esta amplificada 40 veces (A. Talaiekhosani, 2013).

Zwaag preparó una imagen microscópica donde se observan claramente las bacterias y su precipitación de carbonato de calcio (Zwaag S. v., 2010).



Ilustración 9. Foto de un microscopio electrónico de barrido ambiental de precipitación de calcio con amplificación de 20000 veces.

Se sabe que gran variedad de bacterias producen concreto autocurativo (Moldovan, y otros, 2010), (Chen, McKittrick, & Meyers, 2012), (Liu, Tian, & Jiang, 2013), (Bauer, Schmuki, Mark, & Park, 2013), infortunadamente el pH del concreto fresco está entre 10 y 13, complicando la supervivencia de la mayoría de bacterias, además la temperatura del concreto fresco es de alrededor de 70°C y esto es demasiado alto para el crecimiento celular, también cuando se seca el concreto no hay suficiente agua para que se produzca crecimiento celular. Esto quiere decir que las bacterias a usar en este tipo de procesos deben tener una alta resistencia frente a un pH y temperatura elevados y a la escasez de agua.

A diferencia de las bacterias vivas, las esporas bacterianas son resistentes a estas condiciones y pueden vivir a 60 años (Muynck, Cox, Belie, & Verstraetea, 2008).

En muchos estudios se han implementado esporas bacterianas en vez del uso directo de bacterias sobre concreto fresco.

Mecanismo de autocurado	Nombre del microorganismo
Proceso ureolítico	Sporosarcina Pasteurii
	Bacillus megaterium
	Halomonas euryhaline
	Myxococcusxanthus
	Deleya halophila
	Bacillus lentus
	Acinobacter species
	Escherichia coli
	Pseudomonas aeruginosa
	Shewanella species
	Bacillus Cohnii
	Bacillus pseudofirmus
	Bacillus amyloliquefaciens
Proceso de sílice	Bacillus alkalinitrilicus

Tabla 4. Lista de microorganismos aplicables para el desarrollo de concreto autocurativo basadas en sus respectivos mecanismos autocurativos (Talaiekhazani, y otros, 2014)

La familia *Bacillus pasteurii* y *Bacillus sphaericus* son las cepas más usadas en concreto autocurativo. Se evaluaron cinco cepas diferentes de la familia *Bacillus sphaericus* y una cepa de *Bacillus lentus* para determinar la precipitación de carbonato de calcio en piedra caliza degradada, los resultados mostraron que la familia *Bacillus sphaericus* podía precipitar carbonato de calcio pero en diferentes cantidades. También se sabe que cepas de *Bacillus* producen ureasa intracelular y la actividad ureolítica se puede usar para medir la precipitación de carbonato de calcio (Holt, Kried, Senath, Staley, & Williams, 1993). El 1% del peso seco de la célula es la cantidad de ureasa disponible (Braissant, Verrecchia, & Aragna, 2002).

7.1.3.2. Precipitación biológica de silicato polifórmico de hierro – aluminio

Las bacterias acumuladoras de sílice se han estudiado por varios autores (Ferris, Fyfe, & Beveridge, 1987). En un lago contaminado con sedimentos metálicos se encontró un complejo de aluminosilicato de hierro en la superficie de células bacterianas aisladas (Jonkers, Thijssen, Muyzer, Copuroglu, & Schlangen, 2010).

La bacteria *Leuconostoc mesenteroides* juega un papel importante en la precipitación de la sílice a pH ácido. Esta bacteria crea un ambiente ácido utilizando carbohidratos para producir ácido láctico, la solubilidad reducida de la sílice coloidal da como resultados la precipitación. Este método no es recomendable en soluciones ácidas y no es bueno para la durabilidad del concreto (Talaiekhosani, y otros, 2014).

7.1.3.3. Hongos

Estudios recientes han demostrado que es posible reemplazar bacterias con hongos para la producción de carbonato de calcio para curar fisuras (Chávez, 2009). A diferencia de las bacterias estos microorganismos sobreviven en entornos extremos con alta salinidad, alta presión, luz ultravioleta, altas temperaturas, alta radiación y acidez variable (Luo, y otros, 2018).

Los hongos adecuados para el autocurado del concreto son los alcalifílicos, que son hongos filamentosos en forma de cuerda con núcleos individuales y paredes celulares, interconectados formando una pared compleja llamada micelio (Baluska, Volkmann, & Barlow, 2006). Al igual que las bacterias, los hongos necesitan nutrientes y cuando aparecen grietas el agua y el oxígeno que se infiltran, ayudan a las esporas a germinar y crecer, contribuyendo a la obtención de carbonato de calcio (Luo, y otros, 2018).

7.2. Pavimento autocurativo

El pavimento asfáltico es un material autocurativo. Cuando se somete a periodos de descanso tiene la capacidad de recuperar su rigidez y resistencia al cerrar microfisuras que se producen cuando está sometido a cargas de tráfico.

Los tres pasos para el curado autónomo del asfalto son:

- 1) Humedecimiento en las dos caras de la microgrieta.

- 2) Difusión de moléculas de una cara a otra.
- 3) Aleatorización de las moléculas difundidas para alcanzar el nivel de resistencia del material original.

Qiu documentó que la autocuración de un sistema de pavimento asfáltico es un proceso potenciado por la viscosidad que depende del tiempo (periodos de descanso) y la temperatura. Qiu también demostró el tiempo de curación y la dependencia de la temperatura de los materiales bituminosos. Un tiempo de curación mayor y una temperatura elevada resultan en una curación mejor. Un tiempo menor de curación da como resultado la formación de menos puentes o conexiones a través de la interfaz y por lo tanto el desarrollo de un enlace débil a través de la fisura. Sin embargo, si las fisuras no se curan inmediatamente (si las superficies fracturadas no se ponen en contacto entre sí) la eficiencia de curación disminuye.

Esta curación a altas temperaturas se da gracias al efecto tixotrópico, este describe la transformación del aglutinante asfáltico de un estado sólido a gel, permitiendo la recuperación de daños estructurales.

Wu informó que las grietas visibles in situ en los pavimentos asfálticos desaparecen durante periodos de clima cálido, reapareciendo durante el invierno. A altas temperaturas las grietas de la superficie se cierran, pero la temperatura se va disipando rápidamente a lo largo de la profundidad del pavimento, lo que significa que las grietas después de 20mm – 30mm por debajo de la superficie no se curan y reaparecen a temperaturas más bajas o como resultado de una gran carga de tráfico. Los resultados de la investigación de Qiu muestran que las temperaturas por debajo de 20°C son insuficientes para iniciar recuperación completa de pavimentos asfálticos.

Sin embargo estas propiedades pueden mejorar calentando el material asfáltico o agregando modificadores o un agente curativo (rejuvenecedor).

7.2.1. Tecnología autocurativa en pavimentos asfálticos

En el diseño de pavimentos asfálticos lo que comúnmente se busca es mejorar el rendimiento del material, dicho de otro modo, se busca mejorar la capacidad de carga y aumentar la durabilidad. No obstante, los investigadores estiman que el diseño de pavimentos asfálticos no radica en la mejora de las propiedades del mismo, sino en permitir que se repare a su estado original.

El desempeño de autocuración de un pavimento autocurativo se puede mejorar, por ejemplo, añadiendo modificadores y aditivos a la mezcla. Para funcionar en el pavimento asfáltico, la tecnología de autoreparación debe poseer la capacidad de sobrevivir a sus duras condiciones, como durante la construcción en la mezcla y compactación, o en la vida útil del material una vez puesto en obra, en condiciones como la carga de tráfico, condiciones ambientales como la lluvia, hielo, nieve, altas temperaturas

Qiu detalló cinco condiciones vitales para que un agente autocurativo se incluya en el diseño del pavimento asfáltico:

- 1) Buena compatibilidad con el bitumen,
- 2) Estabilidad a altas temperaturas.
- 3) Capacidad de sobrevivir a las condiciones de mezcla y construcción.
- 4) Temperatura de curación entre 30°C y 40°C.
- 5) Capacidad de curación continua en múltiples ocasiones.

Existen varios enfoques de autorreparación para el diseño de pavimentos de asfalto, Hasta la fecha los tres métodos de autocuración son:

- Incorporación de nanopartículas.
- Calentamiento por inducción.
- Rejuvenecimiento.

7.2.1.1. Nanopartículas

7.2.1.1.1. Nanoarcilla

Este tipo de materiales se usan para mejorar el envejecimiento, las propiedades térmicas y reológicas de las mezclas asfálticas (Fang, Yu, Liu, & Li, 2013), también tienen el potencial de reparar microgrietas en el asfalto (Qiu, Ven, Wu, Yu, & Molenaar, 2009). Tabatee y Shafiee (Tabatabaee & Shafiee, 2012) estudiaron el efecto de los periodos de descanso en la vida de fatiga de las mezclas asfálticas con aditivo de arcilla orgánica y encontraron que introduciendo periodos de descanso a un nivel de deformación de 3% y 5% aumentaron la resistencia a la fatiga de la mezcla. Esta investigación demuestra que las nanoarcillas se pueden usar para mejorar propiedades de autocuración de mezclas asfálticas. Pese a esto, el uso de nanoarcillas como técnica de autorreparación no se ha investigado ampliamente y no hay suficiente información sobre el efecto a largo plazo de las partículas de arcilla en el performance de mezclas de asfalto.

7.2.1.1.2. Nanocaucho

Al igual que las nanoarcillas, los modificadores de caucho se usan para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los aglutinantes ayudando al rendimiento insitu del pavimento asfáltico (HT & AP, 2013), (McNally, 2011). Los modificadores de caucho también se han usado como nanopartículas para mejorar las propiedades curativas de la masilla asfáltica, un ejemplo de esto fue el estudio realizado por Qiu (Qiu, Ven, Wu, Yu, & Molenaar, 2009), que

uso nanocaucho como modificador para estudiar la reparación de masilla asfáltica (con aglutinantes de pluma 70/100). Llevó a cabo pruebas de ductilidad autocurativa con masillas que contenían dos tipos de nanocaucho con porcentajes variables de modificador (0 – 5%). La masilla que no contenía modificador (0%) era la mezcla de control. Las pruebas se realizaron en muestras de hueso de perro, se cortaron por el centro, luego se unieron y se dejaron curar por 4 horas a temperatura ambiente (20 – 22°C). Desafortunadamente los autores no mostraron la composición del nanocaucho (Qiu, Ven, Wu, Yu, & Molenaar, 2009), por lo que en los artículos de investigación ningún otro autor logró determinar el tipo de mecanismo que activó el proceso de curación y comprender la variabilidad en el rendimiento de curación. Sin embargo, los resultados mostraron una buena autocuración en la masilla de mezcla de control, hasta un 70% de recuperación. La recuperación de las mezclas asfálticas con modificadores varió del 15% al 90% según el tipo de modificador y la cantidad añadida. El estudio mostro que los modificadores de nanocaucho como estireno – butadieno (SBR), estireno – isopreno – estireno (SIS) o caucho definido se pueden utilizar para mejorar las propiedades de autocuración del asfalto. Lo más probable es que el mecanismo de curación sea un enlace de hidrogeno inverso (Tabakovic & Schlangen, 2015).

El nanocaucho tiene una gran ventaja como modificador y es su doble función, la primera es que puede mejorar la durabilidad de la mezcla de asfalto, y la segunda es que actúa como modificador de autocuración en la mezcla (Fang, Yu, Liu, & Li, 2013). Pero también poseen una desventaja, los modificadores basados en polímeros tienen incompatibilidad termodinámica con el ligante asfáltico debido a las grandes diferencias en sus densidades, peso molecular, polaridad y solubilidad entre el polímero y el asfalto. Estas diferencias pueden causar delaminación del material en conjunto durante el almacenamiento térmico y afectaría negativamente la mezcla de

asfalto cuando se vaya a utilizar (Tabakovic & Schlangen, 2015). Aún es necesario estudiar dos cosas. La incompatibilidad termodinámica de los nanomodificadores, porque a altas temperaturas podría producirse la separación del modificador de nanocaucho y el aglutinante, lo que deterioraría el pavimento asfáltico. Y la segunda, el efecto del tiempo de curación y la temperatura para determinar qué efecto tiene el tiempo en la curación de la mezcla de asfalto. Si es inoperante a temperaturas más bajas y sin mejoras en tiempos de curación en relación con la curación autónoma del bitumen, la tecnología no sería adecuada para la autocuración de pavimentos asfálticos (Tabakovic & Schlangen, 2015).

Aunque esta tecnología de autorreparación de nanopartículas ha demostrado resultados positivos e interesantes a investigar en el diseño de mezclas de pavimentos asfálticos, se debe mostrar evidencia trascendente de su desempeño antes de considerarla como una tecnología de autorreparación viable (Tabakovic & Schlangen, 2015).

7.2.1.2. Calentamiento por inducción

El calentamiento por inducción en el diseño de pavimentos fue emprendido por Minsk (Minsk, Electrically conductive asphalt for control of snow and ice accumulation, 1968), (US Patente n° 3,573,427, 1971), quien desarrolló y patentó el primer pavimento asfáltico que era a su vez conductor eléctrico, utilizaba grafito como medio conductor con el fin de derretir la nieve en la superficie de las carreteras por calentamiento por inducción. Luego distintos autores usaron el calentamiento por inducción para mejorar la autocuración en pavimentos asfálticos (Wu, Liu, Ye, & Li, 2006), (García, Schlangen, Ven, & Lu, 2009), (Liu Q. , Schlangen, García, & Ven, 2010), (Zhang, Wu, & Wang, 2011).

Se usaron fibras de distintos materiales grafito, carbono, acero, lana de acero y polímeros conductores de polianilina. Para estudiar la conductividad eléctrica, la resistividad varió notoriamente con el tipo, tamaño y forma de fibras y rellenos.

Wu estudió el calentamiento por inducción usando fibras de carbono conductoras, carbón negro y grafito como medios conductores, demostró que agregar fibras conductoras a la mezcla es más efectivo que agregar relleno conductor, debido a que aumenta la conductividad de una manera más eficaz (Wu, Liu, Ye, & Li, 2006).

García y Liu desarrollaron una mezcla de pavimento asfáltico autocurativo añadiendo fibras de lana de acero eléctricamente conductoras en la mezcla asfáltica, el mecanismo de activación de autocuración fue calentamiento por inducción (García, Schlangen, Ven, & Lu, 2009), (Liu Q. , Schlangen, García, & Ven, 2010).

García probó este mecanismo de curación mediante pruebas de flujo capilar del bitumen (García Á. , 2012). Liu estudió el efecto curativo por inducción de fibras de acero y lana de acero y caracterizó la curación del asfalto con la siguiente ecuación (Liu Q. , Induction healing of porous asphalt concrete, 2012):

$$HI = \frac{C2}{C1}$$

Donde:

HI = Índice de curación.

C1 = Número de ciclos de carga para la primera carga.

C2 = Número de ciclos de carga para la segunda carga.

Liu comparó el efecto de la lana de acero larga tipo 000 y la fibra de acero corta, los resultados mostraron que la lana de acero larga es mejor que la fibra de acero corta para hacer que el concreto asfáltico poroso sea conductor de electricidad (Liu Q. , Schlangen, García, & Ven, 2010).

Liu también demostró que la adición de fibras de acero a la masilla (bitumen, relleno, arena) refuerza el pavimento asfáltico poroso, por lo que puede atrasar el efecto de desmoronamiento en el pavimento asfáltico, debido a la ventaja que se logra por una mejor unión entre los agregados grandes en el pavimento (Liu Q. , Schlangen, García, & Ven, 2010).

Si bien la curación por inducción mejora la capacidad de autocuración del pavimento asfáltico, asimismo puede envejecer el betún debido al calentamiento de la mezcla. Además, el sobrecalentamiento ($>110^{\circ}$) de la mezcla de asfalto puede causar hinchamiento y drenaje del aglutinante, lo que afectaría negativamente el rendimiento del pavimento, la temperatura de calentamiento óptima según Liu para una mezcla de asfalto poroso es 85°C (Liu Q. , Schlangen, García, & Ven, 2010). En esta investigación también demostró que el grado de daño ocasionado por el sobrecalentamiento también afecta la tasa de curación, o sea, el calentamiento no debe aplicarse demasiado pronto ni demasiado tarde. Demasiado pronto sería cuando el módulo de elasticidad es $>80\%$ del valor de rigidez del pavimento asfáltico, si el calentamiento se aplica demasiado pronto no sería necesario, debido a que el pavimento asfáltico puede curarse por sí mismo (Liu Q. , Schlangen, García, & Ven, 2010).

Demasiado tarde sería cuando el valor del módulo de elasticidad es $<80\%$ del valor de rigidez del pavimento asfáltico original, el efecto de curación es pobre porque pueden ocurrir daños estructurales como deformaciones permanentes o agrietamiento de agregados de piedra y estos daños están más allá del proceso de curación por inducción. Se pueden obtener mejores

resultados de curación cuando se combinan periodos de descanso con el calentamiento por inducción. Al final Liu concluyó que la curación se puede mejorar en un 15% si la curación autógena es ayudada por calentamiento por inducción.

En el 2010 en la Delft University of Technology en cooperación con la autoridad nacional de carreteras de países bajos repavimentó una carretera utilizando una mezcla asfáltica autocurativa por inducción, esta mezcla contenía fibras de acero de 1cm de longitud. Se aplicó la técnica de curación por inducción que dio como resultado la supervivencia perfecta del tramo durante los tres inviernos (Kumar, 2020).

El calentamiento por inducción es la tecnología para pavimentos que ha avanzado relativamente rápido, su efecto de envejecimiento se compensa con su capacidad curativa. Aún falta un problema por abordar en las fibras y lana de acero y es la pérdida de conductividad por oxidación (corrosión). Aunque este problema puede ser solucionado sustituyendo el acero por fibras de carbono o polímeros conductores (Zhang, Wu, & Wang, 2011), (Wu, Mo, Shui, & Chen, 2005).

Basado en la recuperación de la fuerza, la recuperación de la rigidez, los ensayos de abrasión, la extensión de la vida de fatiga de los núcleos y vigas de asfalto poroso, los autores determinaron que la capacidad de curación del concreto de asfalto poroso aumenta mediante el calentamiento por inducción.

Además algunos aditivos conductores pueden mejorar la durabilidad del concreto asfáltico, aumentando así la vida útil del pavimento (Liu Q. , Schlangen, García, & Ven, 2010), (Wu, Zhang, & Chen, Research on mechanical characteristics of conductive asphalt concrete by indirect tensile test, 2010), (Liu & Wu, 2011). Este aspecto de la tecnología de inducción de

autocuración debe desarrollarse más para el inicio de los procesos de curación y también para la autocuración de la salud del pavimento asfáltico.

7.2.1.3. Rejuvenecimiento

El pavimento asfáltico puede recuperar su mecanismo de autorreparación por medio de la adición de bitumen con un valor de penetración más alto o adicionando un agente rejuvenecedor (Oliveira, Silva, Abreu, & Pereira, 2012). Un rejuvenecedor es una emulsión catiónica diseñada que contiene maltenos y saturados. El propósito del rejuvenecedor es difundirse en el aglutinante envejecido y restaurar su estructura molecular original para extender la vida útil del pavimento. La vida útil del pavimento se prolonga ajustando las propiedades de la mezcla asfáltica, o sea, reduciendo la rigidez. Algunos agentes rejuvenecedores disponibles comercialmente son Reclamite, Paxole 1009, Cyclepave y ACF Iterlene 1000. Hay estudios que demuestran que el aceite vegetal y el aceite desecho de cocina se pueden usar como rejuvenecedor (García, Jelfs, & Austin, Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules, 2015), (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, 2015). Es posible usar rejuvenecedor en una etapa temprana para curar grietas. Shen encontró que ningún rejuvenecedor podría penetrar más de 20 mm en la capa de pavimento de asfalto, lo que indica que las grietas que se generen en la parte inferior de la capa de asfalto no serán reparadas (Shen, Amirkhanian, & Miller, 2007).

Otro problema al aplicar el rejuvenecedor es la necesidad de cerrar las carreteras. Los rejuvenecedores pueden provocar una reducción significativa de la fricción superficial del pavimento y pueden ser perjudiciales para el medio ambiente. Para superar estos problemas la inclusión de microcápsulas rellenas de rejuvenecedor es una alternativa prometedora (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules

containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, 2015), (Su & Schlangen, 2012), (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method, 2014).

7.2.1.4. Microcapsulas

Su, Schlangen y García (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, 2015), (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, 2015), (Su & Schlangen, 2012), (Garcia, Schlangen, & Ven, 2010), estudiaron la inclusión de microcápsulas rellenas de un rejuvenecedor. Básicamente su función se emplea cuando se comienzan a formar microgrietas en el pavimento, estas se encuentran con una cápsula en el camino de propagación. La grieta termina fracturando también la cápsula y libera el agente curativo. El agente se mezcla con el aglutinante de asfalto para sellar la grieta, evitándola formación de macrogrietas. Su y Schlangen (Su & Schlangen, 2012) y García (Garcia, Schlangen, & Ven, 2010) demostraron que se pueden fabricar distintos tipos de cápsulas suficientemente estables y resistentes térmica y mecánicamente para sobrevivir al proceso de producción de asfalto. Hoy en día las cápsulas de mayor éxito que se han fabricado son hechas con un prepolímero de melanina – formaldehído modificado con metanol y el rejuvenecedor era un producto aceitoso (Su, Qiu, & Schlangen, Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen, 2013). La eficacia de la fabricación de microcápsulas se mide por la cantidad de rejuvenecedor retenido dentro de la microcápsula (Su & Schlangen, 2012). La mayor eficacia alcanzada fue del 70% (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method, 2014), con estas condiciones de producción:

- Relación núcleo / carcasa de 1:3.
- Velocidad de agitación de 3000 rpm.
- 2 – 2,5% en peso de dispersante de copolímero de anhídrido maléico y estireno (SMA).

El tamaño óptimo de las cápsulas debe ser menor a 50µm, esto debido a que las capas de mortero de asfalto entre partículas de agregado en un pavimento asfáltico tienen un espesor de 50 µm, si las cápsulas son más grandes de 50 µm pueden ser exprimidas o pulverizadas en el proceso de mezcla y compactación del pavimento asfáltico. Las cápsulas tampoco pueden ser de 10 µm o más pequeñas porque no podrían almacenar suficiente rejuvenecedor para ayudar al aglutinante envejecido (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method, 2014).

La imagen 9 muestra la morfología del bitumen con cápsulas de contenido variable, del 10 – 30% del volumen total del aglutinante, y cápsulas de tamaño variable de 10 a 30 µm.

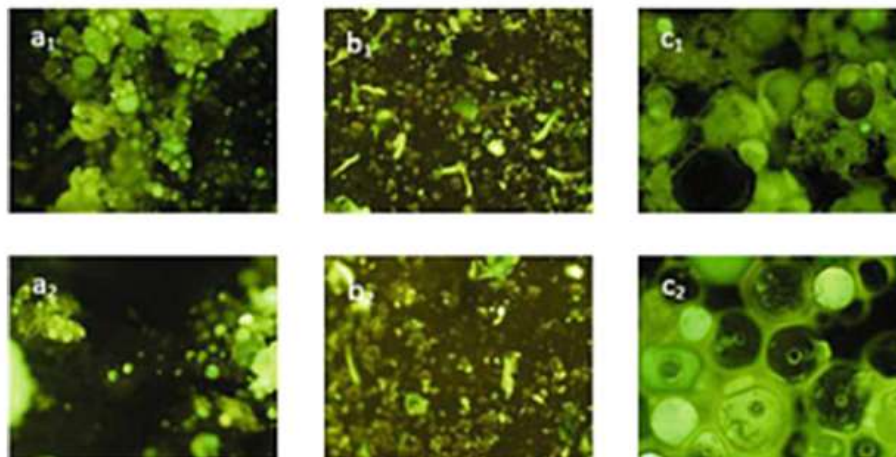


Ilustración 10. Fotos de un microscopio de fluorescencia de la morfología de muestras de bitumen con contenido de microcápsulas variable del 10% (a1, b1, c1,) al 30% (a2, b2, c2) y diámetros variables $<10\ \mu\text{m}$ (a1, a2), $20\ \mu\text{m}$ (b1, b2), y $30\ \mu\text{m}$ (c1, c2), (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method, 2014).

Las microcápsulas a1 y a2 tienden a juntarse / aglomerarse debido a la atracción electrostática de partículas diminutas. Las microcápsulas b tienen una distribución homogénea, evitando la aglomeración de estas en el bitumen. La figura c2 muestra que las microcápsulas grandes ocuparán más espacio, donde el contenido de la cápsula en el bitumen es 30%, esto podría conducir a la separación de la interfaz entre las microcápsulas y el aglutinante y puede desatar la formación de microfisuras u otros defectos estructurales (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method, 2014), (Su, y otros, 2011). Lo que llevaría a un rendimiento mecánico deficiente y a una falla prematura en el pavimento. En resumen, el contenido óptimo de microcápsulas en el bitumen no debe superar el 30% del volumen total de bitumen dentro de una mezcla asfáltica (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method, 2014).

Su usó rejuvenecedores producidos a partir de aceite de cocina de desecho reciclado (WCO), y demostró que se pueden encapsular y utilizar en la autocuración del asfalto (Su, Qiu, Schlangen, & Wang, Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen, 2015). Implementó microcápsulas con una alta resistencia de cubierta de 1.00 a 1.52 GPa, una relación núcleo cubierta de 1:3 y punto de fusión de 180°C, lo que les da una buena estabilidad térmica para sobrevivir al proceso de producción del asfalto. En esta investigación Su demostró que el rejuvenecedor WCO puede penetrar y rejuvenecer con éxito el aglutinante del bitumen estándar envejecido 80/100 y desactivarlo a una temperatura de 0°C.

Esta iniciativa es favorable para la autocuración del asfalto, ya que permite el rejuvenecimiento del aglomerante envejecido, aunque existe una desventaja, su limitante de un solo uso debido a que una vez el material autocurativo se libera, no se puede reponer (Qiu, Ven, Wu, Yu, & Molenaar, 2009). Sin embargo, este método aún está en su etapa inicial, las investigaciones futuras se deben enfocar en introducir una dosis razonable de microcápsulas en la mezcla asfáltica para lograr una dispersión adecuada de las cápsulas en toda la mezcla asfáltica (Tabakovic & Schlangen, 2015).

8. COSTOS Y BENEFICIOS

8.1. Concreto autorreparable

La posibilidad de crear concretos más duraderos es cada vez más grande, debido a la eficacia de cicatrización de grietas y la recuperación de propiedades mecánicas que se puede lograr con los agentes autocurativos, además que ayuda a la reducción de los costos elevados de servicios de mantenimiento y reparación de las infraestructuras de concreto (Wang, Dewanckele, Cnudde, Vlierberghe, & Belie, 2014).

En EE.UU se gastan anualmente 5,2 mil millones de dólares en el mantenimiento de puentes, además un análisis completo del ciclo de vida del pavimento asfáltico dio como resultado que el costo por retrasos y pérdida de productividad es aproximadamente 10 veces mayor que el costo del mantenimiento y reparación de los pavimentos (Freyermuth, 2001). En 2006 un estudio dio a conocer que se gastan entre 18 y 21 mil millones de dólares al año en reparación, protección y fortalecimiento; en cambio para el mantenimiento debido a la corrosión del acero se estimó un costo de 125 mil millones de dólares por año (Emmons & Sordyl, 2006).

La Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles estimó una inversión de 3,6 trillones de dólares en un periodo de 7 años para reparar y mantener la infraestructura estadounidense (Sidiq, Gravina, & Giustozzi, 2019). En Reino Unido, el 45% del gasto anual en construcción es destinado al mantenimiento y la reparación (Sidiq, Gravina, & Giustozzi, 2019). En Países Bajos una tercera parte del presupuesto anual de obras de ingeniería civil se gasta en inspección, seguimiento, mantenimiento, mejora y reparación (Sidiq, Gravina, & Giustozzi, 2019). En general en Europa casi el 50% del presupuesto anual de construcción se gasta en mantenimiento y reparación (Hilloulin, Tittelboom, Gruyaert, Belie, & Loukili, 2015). En China

aproximadamente 250 mil millones de renmimbis por año son usados en el mantenimiento de los refuerzos por corrosión y la degradación del concreto (Han & Xing, 2016).

Si se usan materiales para hacer concreto con la capacidad de autocurarse, se reducirá la fabricación de materias primas para la construcción de nuevas infraestructuras, y por lo tanto, las estructuras serán más sostenibles y rentables (Achal, Mukherjee, & Reddy, 2010), (Sidiq, Gravina, & Giustozzi, 2019). Van Breugel realizó el análisis del ciclo de vida conceptual para la autoreparación del concreto basado en mezclas de concreto sin propiedades autocurativas. Para estructuras de concreto normales, se necesitan varias reparaciones a intervalos de tiempo regulares después de la construcción para mantener el rendimiento inicial de la estructura hasta el momento de la primera reconstrucción. La línea de puntos B muestra la durabilidad mejorada de la estructura cuando se utiliza concreto autocurativo; sin embargo, se requieren costos de construcción iniciales más altos, pero el beneficio económico puede ser potencialmente mayor durante el ciclo de vida (Sidiq, Gravina, & Giustozzi, 2019).

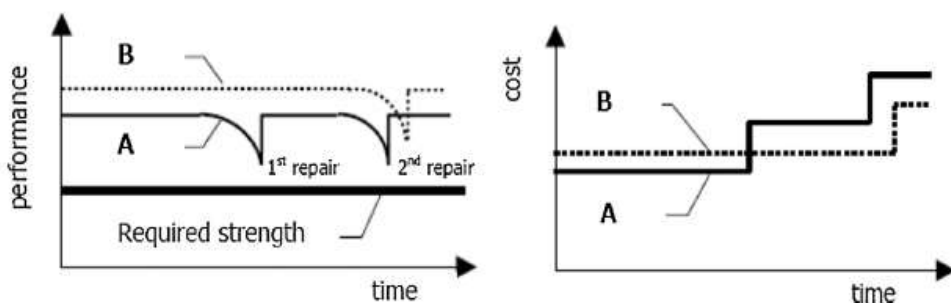


Ilustración 11. Ciclo de vida conceptual del concreto estándar (línea A) en comparación con el concreto con capacidad de autocuración (línea B), (Amir Sidiq, 2019).

El costo de ciclo de vida del concreto autorreparable es difícil de estimar con precisión, ya que aún se encuentra en estado de “prueba de concepto” y se han realizado pocos ensayos en estructuras reales. Wang determinó un aumento de los costos de construcción del 7 % al 28 % en concretos autocurativos que utilizan bacterias como mecanismo autoreparable, y del 5% al 21%

cuando las bacterias se utilizan con poliuretano y gel de sílice. Li calculó el costo de las microcápsulas auto – sintetizadas en forma seca alrededor de \$15/kg consistentes en úrea – formaldehído como caparazón y rellenas de resina epóxica como agente curador (Li, Zhu, Zhao, & Jiang, 2016).

8.2. Pavimento autorreparable

Para analizar las reducciones de costos que se pueden alcanzar con materiales autorreparables, es factible comparar el aumento en los costos de materiales con la disminución en los costos de mantenimiento. También hay que tener en cuenta la aplicación y costos operativos, de eliminación y ambientales para comprender un análisis costo – beneficio. Se espera que cuando se emplee asfalto autorreparable, se extiendan los periodos de mantenimiento en carreteras, lo que reducirá congestión del tráfico y los costos asociados.

Por ejemplo, en Países Bajos los ahorros anuales combinados relacionados con reparaciones importantes y costos de congestión de tráfico son de aproximadamente 65 millones de euros para una extensión de la vida útil del asfalto del 25%, y de 100 millones de euros para una extensión de la vida útil del 50% para el pavimento asfáltico poroso de toda la red de carreteras de Países Bajos (Tabakovic & Schlangen, 2015). Si el precio del asfalto autocurativo fuera el doble que el del asfalto estándar, los Países Bajos aún ahorrarían aproximadamente 90 millones de euros al año al invertir en asfalto autocurativo con una vida útil prolongada del 50% en comparación con el asfalto tradicional. Si se comparan los ahorros potenciales de los Países Bajos con la Unión Europea en conjunto, los ahorros podrían llegar a 9 mil millones de euros (Schlangel, 2013). Estas cifras muestran los beneficios económicos, financieros, ambientales y sociales que la tecnología autocurativa puede ofrecer en los pavimentos asfálticos. Butt estudió el efecto de la autocuración sobre la vida útil, la energía y el medio ambiente de los pavimentos

asfálticos. Utilizando un marco de análisis del ciclo de vida (LCA), realizado junto con un modelo numérico que simula la capacidad de autocuración de pavimentos asfálticos (Kringos, Schmets, & Scarpas, 2011), determinó que los pavimentos asfálticos autocurables aumentaban la vida útil del pavimento en un 10% de 20 años a 22 años en comparación con pavimentos asfálticos tradicionales. Este aumento en la vida útil es beneficioso ambientalmente hablando, ya que se reduciría el consumo de energía en un 3% y además también se reducirían las emisiones de CO₂ en un 3% aproximadamente.

Si el aumento de la vida útil se proyecta 100% de 20 años a 40 años, basado en el supuesto de que la tecnología de autocuración puede duplicar la vida útil del pavimento asfáltico, los beneficios aumentarían en términos de reducción de costos y reducciones de consumo de energía y emisión de CO₂. Si se implementa esta tecnología insitu a gran escala se puede lograr una mayor comprensión del potencial de la tecnología de autocuración de pavimentos asfálticos, un ejemplo es la carretera A58 en Países Bajos (Schlangel, 2013).

Los claros beneficios de los materiales asfálticos autorreparables, en forma de una mayor vida útil del pavimento asfáltico y menores costos de mantenimiento, solo se hacen evidentes con el tiempo. Steyn dijo: “El punto importante que hay que tomar de la realidad es que para que cualquier innovación proporcione un beneficio real en el campo de la ingeniería de pavimentos, debe haber una relación beneficio/costo positiva real” (Steyn, 2009).

9. BENEFICIOS Y DIFICULTADES EN EL ENTORNO COLOMBIANO

Los mayores beneficios que las tecnologías autoreparantes traerían a los constructores del país serían económicos, como se ha mencionado la inversión inicial sería mayor, pero comparando esta diferencia con la inversión en mantenimiento de una estructura convencional se estaría ahorrando mucho más, ahora bien, hay otros aspectos positivos a destacar aparte de los económicos. En cuanto a los concretos autoreparantes se sabe que el agente candidato más apto para ser usado hasta el momento son las esporas bacterianas, estas son resistentes a las condiciones de la mezcla del concreto, pero aún no se han hecho pruebas suficientes en todo tipo de entornos, por ejemplo, en ciudades cercanas al mar, en donde algunas edificaciones están expuestas a la salinidad del agua lo que puede afectar el pH, o en ciudades con ambientes extremos bajo cero, además de lugares en donde por el cambio climático debido a las estaciones del año las estructuras están expuestas por meses a la nieve o el hielo, y en otros meses a un intenso calor. En Colombia sería más fácil implementar esporas bacterianas, debido a que se puede determinar el tiempo y el clima según las condiciones físico – geográficas sobre el territorio colombiano, factores como la localización en la zona tropical, la localización en relación con el Océano Pacífico, Atlántico y el Mar Caribe, la localización con relación a la cuenca amazónica, o características locales como la altitud y la cercanía a ríos y lagunas (Torres, 2018), nos ayudan a saber a qué condiciones ambientales va a estar expuesta la estructura, además el clima en Colombia no varía tan abruptamente como en otras partes del mundo, por ejemplo, en Nueva York donde los veranos son calientes y húmedos, los inviernos son muy fríos y ventosos, está mojado y parcialmente nublado todo el año. La temperatura más baja registrada en Nueva York fue de $-15,5^{\circ}\text{C}$ (20 minutos, 2014) y la más alta fue de 36°C (El Espectador, 2015), mientras que en Bogotá la temperatura más alta fue de $25,1^{\circ}\text{C}$ (IDEAM, 2017) y la más baja de $0,3^{\circ}\text{C}$ (Semana, 2020), se puede ver que aunque en Bogotá la temperatura puede variar

durante el día, no lo hace tan drásticamente como en otras partes del mundo, esto solo como ejemplo para ver la variación climatológica que puede presentar una ciudad en Colombia a comparación de otra en el mundo. Teniendo esto en cuenta las esporas bacterianas no se verían expuestas a cambios drásticos de temperatura. Aunque esta tecnología no se ha probado en ambientes extremos, se sabe a grandes rasgos que el pH y la temperatura son factores que pueden alterar el crecimiento de microorganismos (Martinez, Equihua, & Quiñones, 2017). Esto solo mencionando la tecnología autocurativa mejor posicionada y con mejores expectativas para ser integrada a futuro. Hay otras tecnologías que supondrían un reto constructivamente hablando para ser implementadas en Colombia, como las redes de tubos huecos rellenos de agentes curativos, que desde un punto de vista ingenieril no son tan eficientes debido a que es complicado implementar un sistema de tuberías en una edificación, además saldría mucho más costoso.

En cuanto a los pavimentos autoreparantes los beneficios serían los mismos, el calentamiento por inducción extiende la vida útil del material y por este motivo se reducirían costos en mantenimiento, el único aspecto negativo es que habría que invertir en una máquina o vehículo que genere calentamiento por inducción para poder hacer el respectivo mantenimiento, que según Liu es cada dos años aproximadamente (Liu, Schlangen, & Bochove, 2013).

También habrían beneficios ambientales, al ser más longevos los materiales autocurativos daría como resultado una disminución en la producción de los mismos, lo que, a su vez, conduciría a una reducción en la emisión de dióxido de carbono (Lee & Park, 2018).

10. CONCLUSIONES

Se pueden agrupar los tipos de autocuración en dos grandes grupos:

- Autónoma (sin ninguna intervención).
- No autónoma (necesita intervención humana o un disparador externo).

Sabiendo esto, se puede designar el tipo de autocuración adecuado para cada material, aunque estos dos materiales se utilizan en la construcción, las tecnologías apropiadas para cada uno están en tipos de autocuración opuestos. Para el concreto sería mejor una curación autónoma, la tecnología más prometedora serían las microcápsulas. Los procesos biológicos y químicos arrojan resultados positivos, en los procesos biológicos dos agentes curadores destacan, las esporas bacterianas que usan el mecanismo de precipitación de calcio y los hongos, aunque estos necesitan más profundización. En cuanto a los procesos químicos los agentes curativos más adecuados serían los cianoacrilatos, debido a que son sistemas de un solo componente y no necesitan de un endurecedor para curar las grietas, además, su baja viscosidad (<10Pcs) los ayuda a llegar o fluir más fácilmente a las zonas donde se producen grietas. Estas tecnologías autónomas tienen el potencial de curar grietas de hasta 1mm, y generalmente actúan rápido. Aun así sigue siendo difícil elegir un enfoque de curación perfecto para concretos, ya que todos tienen ventajas y deficiencias.

Por el contrario, para los pavimentos asfálticos, el tipo de curación conveniente sería el no autónomo, está demostrado insitu y en laboratorio que el calentamiento por inducción es la tecnología más adecuada para los asfaltos, aunque necesita de la intervención del ser humano para ayudar a curar el asfalto envejecido, la gran ventaja de esta tecnología es que se puede reutilizar, mientras que una vez las microcápsulas entran en funcionamiento liberando el agente curador, estas ya dejarían de ejercer su rol dentro del material.

En el entorno colombiano los beneficios ambientales y económicos aplicarían al igual que en todo el mundo, sin embargo, las tecnologías autocurativas en los concretos aún están en desarrollo y perfeccionamiento, por lo que se podrían implementar en unos años cuando ya estén más avanzadas y probadas. Por otro lado, la tecnología autocurativa en pavimentos asfálticos por inducción está lo suficientemente madura y a la espera de promoción en la industria, por lo que es más factible que la autocuración de calentamiento por inducción llegue primero al país.

Sabiendo el análisis que realizado por Tabakovic y Schlangen en Países Bajos de los ahorros que se obtendrían si se aumenta la vida útil del pavimento nos damos una idea del ahorro que podrían obtener las alcaldías de las principales ciudades del país, este tipo de tecnologías podrían ser implementadas primero en los corredores viales de los sistemas masivos de transporte como el Transmilenio en Bogotá, el Mio en Cali, el Metrolínea en Bucaramanga, el Megabus en Pereira, el Transcribe en Cartagena, el Metroplus de Medellin o el Transmetro en Barranquilla, ahorrando gran parte del presupuesto que está destinado para el mantenimiento de estos tramos y pudiendo invertirlo en otras problemáticas de las ciudades.

Los concretos autoreparantes podrían ser implementados en ciudades que estén ubicadas en zonas sísmicas de alto riesgo, como Armenia, Pereira, Cúcuta, Bucaramanga, Cali, Pasto, Cauca y Chocó. Si se presenta un evento sísmico de gran magnitud las edificaciones deben soportar sin ningún problema, esto porque deben cumplir Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, pero no están exentas de presentar microfisuras que posteriormente causen daños irreparables con el paso del tiempo, las edificaciones podrían curarse a sí mismas, aunque estas tecnologías sean de un solo uso, las edificaciones no están expuestas a un uso tan desgastante como el de un tramo vial, por lo que la tecnología autoreparante solo entraría en funcionamiento cuando se produzca una anomalía en la estructura.

11. BIBLIOGRAFÍA

- 20 minutos. (1 de Julio de 2014). Nueva York sufre el frío más intenso desde hace 118 años. *20 minutos*.
- Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2010). Microbial Concrete: Way to Enhance the Durability of Building Structures. *Materials in Civil Engineering*, 730 - 734.
- Baluska, F., Volkmann, D., & Barlow, P. W. (2006). Cell-cell channels and their implications for cell theory, in cell-cell channels. *Springer*, 1 - 18.
- Bauer, S., Schmuki, P., Mark, K. v., & Park, J. (2013). Engineering biocompatible implant surfaces: Part I: Materials and surfaces. *Progress in Materials Science*, 261- 326.
- Braissant, O., Verrecchia, E. P., & Aragna, M. (2002). Is the contribution of bacteria to terrestrial carbon budget greatly underestimated? *Naturwissenschaften*, 366 - 370.
- Castainer, S., Le, M. G., & Perthuisot, J. P. (2000). Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals. En *In microbial sediments* (págs. 32- 39). Heidelberg: Springer-Verlag.
- Chávez, R. (2009). Filamentous fungi from extreme environments as a promising source of novel bioactive secondary metabolites. *Frontiers in microbiology*, 903.
- Chen, P., McKittrick, J., & Meyers, M. A. (2012). Biological materials: Functional adaptations and bioinspired designs. *Progress in Materials Science*, 1492 - 1704.

- Daisuke Homma, H. M. (2009). Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology* , 217 - 228.
- Delft University of Technology. (13 de Abril de 2007). *EurekaAlert*. Obtenido de https://www.eurekaalert.org/pub_releases/2007-04/duot-fic_1041307.php
- Delft University Tecnology. (2007). First international conference on self-healing materials.
- Douglas, S., & Beveridge, T. J. (1998). Mineral formation by bacteria in natural Communities. *FEMS Microbiology Ecology*, 79 - 88.
- Dry, C. (1994). Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Materials and Structures*, 118.
- El Espectador. (20 de enero de 2014). *elespectador.com*. Obtenido de <https://www.elespectador.com/noticias/nacional/ordenan-demoler-todas-las-torres-del-edificio-space/>
- El Espectador. (8 de Septiembre de 2015). Récord de calor en Nueva York. *El Espectador*.
- Emmons, P., & Sordyl, D. (2006). The state of the concrete repair industry, and a vision for its future. *Concrete repair bulletin*, 7 - 14.
- European Union Road Federation. (2012). *European road statistics 2012*. Brussels: European Union Road Federation (ERF).
- Fang, C., Yu, R., Liu, S., & Li, Y. (2013). Nanomaterials applied in asphalt modification: a review. *Materials Science and Technology*, 589 - 594.

- Ferris, F. G., Fyfe, W. S., & Beveridge, T. J. (1987). Metallic ion binding by *Bacillus subtilis*: implications for the fossilization of microorganisms. *Geology*, 149 - 152.
- Freyermuth, C. L. (2001). Life-Cycle Cost Analysis for Large Bridges. *Concrete International*, 89 - 95.
- García, Á. (2012). Self-healing of open cracks in asphalt mastic. *Fuel*, 264-272.
- García, A., Jelfs, J., & Austin, C. J. (2015). Internal asphalt mixture rejuvenation using capsules. *Construction and Building Materials*, 309 - 316.
- García, A., Schlangen, E., & Ven, M. V. (2010). Two ways of closing cracks on asphalt concrete pavements: microcapsules and induction heating. *Key Engineering Materials*, 573 - 576.
- García, A., Schlangen, E., Ven, M. v., & Lu, Q. (2009). Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*, 3175 - 3181.
- Garside, M. (17 de Febrero de 2021). *Major countries in worldwide cement production 2010-2020*. Obtenido de statista.com: <https://www.statista.com/statistics/267364/world-cement-production-by-country/>
- Ghosh, P., & Mandal, S. (2006). Development of bioconcrete material using an enrichment culture of novel thermophilic anaerobic bacteria. *Indian Journal of Experimental Biology*, 336 - 339.
- Ghosh, S. K. (2009). *Self-Healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications*. Weinheim: Wiley WCH.

- H. Mihashi, Y. K. (2000). Fundamental study on development of intelligent concrete characterized by self-healing capability for strength. *Transactions of the Japan Concrete Institute*, 441- 450.
- Han, N.-X., & Xing, F. (2016). A Comprehensive Review of the Study and Development of Microcapsule Based Self-Resilience Systems for Concrete Structures at Shenzhen University. *Materials*, 10.
- Hartnett, K. (2014). Why is ancient Roman concrete still standing? *Boston Globe*.
- Hearn, N., & Morley, C. T. (1998). Self-healing property of concrete – experimental evidence . *Materials & Structures*, 563.
- Hilloulin, B., Tittelboom, K., Gruyaert, E., Belie, N. D., & Loukili, A. (2015). Design of polymeric capsules for self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 298 - 307.
- Holt, J. G., Kried, N. R., Senath, P. H., Staley, J. T., & Williams, S. T. (1993). *Williams and Wikins*, 786 - 788.
- Homma, D., Mihashi, H., & Nishiwaki, T. (2009). Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 217 - 228.
- HT, M., & AP, V. (2013). Influence of fiber polymer reinforced asphalt concrete pavement in high temperature environment. *Proceedings of the 2nd electronic international interdisciplinary conference* (págs. 465–468). Zilina, Slovak Republic: EICC.
- IDEAM. (9 de Febrero de 2017). *BOGOTÁ SUPERÓ SU PICO HISTÓRICO DE TEMPERATURA*. Obtenido de ideam.gov.co:

http://www.ideam.gov.co/web/intranet/noticias/-/asset_publisher/gO37c5HXVo8L/content/bogota-supero-su-pico-historico-de-temperatura?_101_INSTANCE_gO37c5HXVo8L_redirect=http%3A%2F%2Fwww.ideam.gov.co%2Fweb%2Fintranet%2Fnoticias%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_gO37c

Industry, A. C. (2018). *Cement Industry*. Obtenido de

<http://www.cement.org.au/AustraliasCementIndustry/CIFFastFacts.aspx>.

Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological Engineering*, 230 - 235.

Joseph, C., Jefferson, A. D., & Cantoni, M. B. (2007). Issues relating to the autonomic healing of cementitious materials . *Proceedings of first international conference on self-healing materials* (pág. Paper 61). Noordwijkaan Zee, Netherlands: Springer CDROM.

Joseph, C., Jefferson, A., Isaacs, B., Lark, R., & Gardner, a. D. (2010). Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. *Magazine of Concrete Research*, 831 - 843.

Kringos, N., Schmets, A., & Scarpas, A. (2011). Towards an understanding of the selfhealing capacity of asphaltic mixtures. *HERON*, 45 - 74.

Kumar, P. G. (2020). Mixtures, Application of Nano Silica to Improve Self-Healing of Bitumen. *CRPASE: TRANSACTIONS OF CIVIL AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING*, 276 - 280.

- La República. (17 de Octubre de 2014). *larepublica.co*. Obtenido de <https://www.larepublica.co/economia/idu-iniciara-reparacion-de-vias-de-transmilenio-y-sitp-con-una-inversion-de-61754-millones-2181666>
- Lee, Y. S., & Park, W. (2018). Current challenges and future directions for bacterial self-healing concrete. *Applied Microbiology and Biotechnology*.
- Li, V. C., & Yang, E. (2007). An alternative approach to 20 centuries of materials science. En *Self Healing Materials* (págs. 161 - 194). The Netherlands: Springer.
- Li, V., Lim, Y. M., & Chan, Y. W. (1998). Feasibility study of a passive smart self-healing cementitious composite. *Composites Part B*, 819 - 827.
- Li, W., Zhu, X., Zhao, N., & Jiang, Z. (2016). Preparation and Properties of Melamine Urea-Formaldehyde Microcapsules for Self-Healing of Cementitious Materials. *Materials*, 152.
- Liu, K., Tian, Y., & Jiang, L. (2013). Bio-inspired superoleophobic and smart materials: Design fabrication, and application. *Progress in Materials Science*, 503 - 564.
- Liu, Q. (2012). *Induction healing of porous asphalt concrete*. Delft: Delft University of Technology.
- Liu, Q., Schlangen, E., & Bochove, G. v. (2013). The first engineered selh - healing asphalt road; How is it performing? *Materials & Enviroment*.
- Liu, Q., Schlangen, E., García, Á., & Ven, M. v. (2010). Induction heating of electrically conductive porous asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 1207 - 1213.
- Liu, X., & Wu, S. (2011). Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 1807 - 1811.

- Luhar, S. (2015). A Review Paper on Self Healing Concrete. *Journal of Civil Engineering Research*, 53-58.
- Luo, J., Chen, X., Crump, J., Zhou, H., Davies, D. G., Zhou, G., . . . Jin, C. (2018). Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete. *Construction and building materials*, 275 - 285.
- Martinez, J. C., Equihua, R. O., & Quiñones, J. G. (2017). Acerca del Desarrollo y Control de Microorganismos en la Fabricación de Papel. *Conciencia Tecnológica* .
- McNally, T. (2011). *Polymer modified bitumen properties*. Philadelphia: Woodhead.
- Minsk, L. D. (1968). Electrically conductive asphalt for control of snow and ice accumulation. *Transportation Research Board*, 57 - 63.
- Minsk, L. D. (1971). *US Patente n° 3,573,427*.
- Moldovan, A., Patachia, S., Vasile, C., Darie, R., Manaila, E., & Tiorean, M. (2010). Natural Fibres/Polyolefins Composites (I) UV and Electron Beam Irradiation J. Biobased Mater. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 58 - 79.
- Muynck, W. D., Cox, K., Belie, N. D., & Verstraetea, W. (2008). Bacterial carbonate precipitation as an alternative surface treatment for concrete. *Construction and Building Materials*, 875 - 885.
- Nilson, A. H. (2001). *Diseño de Estructuras en Concreto*. Bogotá: Mc Graw Hill.
- Nishiwaki, C. (1997). *Fundamental study on development of intelligent concrete with self-healing capability*. Sendai, Japón: Department of Architecture and Building Science.

- Nishiwaki, T., Mihashi, H., Jang, B.-K., & Miura, K. (2006). Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 267 - 275.
- Nishiwaki, T., Mihashi, H., Jang, B.-K., & Miura, K. (2006). Development of Self-Healing System for Concrete with Selective Heating around Crack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 267 - 275.
- Oliveira, J., Silva, H., Abreu, L., & Pereira, P. (2012). Effect of Different Production Conditions on the Quality of Hot Recycled Asphalt Mixtures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 266 - 275.
- Pang, J., & Bond, I. (2005). Bleeding composites'—damage detection and self-repair using a biomimetic approach. *Composites: Part A*, 183 - 188.
- Qian, S., Zhou, J., Rooij, M. d., Schlangen, E., Ye, G., & Breugel, K. v. (2009). Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. *Cement & Concrete Composites*, 613 - 621.
- Qiu, J., Ven, M. F., Wu, S., Yu, J., & Molenaar, A. A. (2009). Investigation of self healing capability of bituminous binders. *Road Materials ans Pavement Design*, 81 - 94.
- Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., & Bang, S. S. (2001). Remediation of Concrete Using Microorganisms. *ACI. Materials*, 3 - 9.
- RCN radio. (Enero de 2018). www.rcnradio.com. Obtenido de <https://www.rcnradio.com/bogota/8-mil-losas-transmilenio-pesimo-estado-ponen-riesgo-los-bogotanos>

Scopus. Obtenido de

<https://www.scopus.com/term/analyzer.uri?sid=1b3b6e8ad3821140da5dc27b3899f37a&origin=resultlist&src=s&s=TITLE-ABS-KEY%28concrete+healing%29&sort=cp-f&sdt=b&sot=b&sl=31&count=1077&analyzeResults=Analyze+results&txGid=1fb74182c9d05c3809222f714d3fda1a#sprea>

Riding, R. (2000). Microbial Carbonates: The geological record of calcified bacterial mats and biofilms. . *Sedimentology*, 179 - 214.

Sangadji, S., & Schlangen, E. (2011). *Feasibility and potential of prefabricated porous concrete as a component to make concrete structures self-healing*. RILEM Publications SARL.

Schlangel, E. (2013). Other materials, applications and future developments. *Self-healing phenomena in cement-based materials*, 241 - 256.

Semana. (2017). Losas de transmilenio: ahora responden las cementeras. *Revista Semana*.

Semana. (11 de Octubre de 2018). *semana.com*. Obtenido de

<https://www.semana.com/nacion/articulo/megapuentes-en-colombia-hisgaura-con-sus-anomalias-enciende-las-alarmas/590266>

Semana. (2020). Frío extremo y calor sofocante: ¿Qué pasa con el clima en Bogotá? *Semana*.

Shen, J., Amirkhanian, S., & Miller, a. J. (2007). Effects of Rejuvenating Agents on Superpave Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 376.

- Sidiq, A., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2019). Is concrete healing really efficient? A review. *Construction and Building Materials*, 257 -273.
- Steyn, W. J. (2009). Potential Applications of Nanotechnology in Pavement Engineering. *Transportation Engineering*, 764 - 772.
- Su, J. -F., & Schlangen, E. (2012). Synthesis and physicochemical properties of high compact microcapsules containing rejuvenator applied in asphalt. *Chemical Engineering Journal*, 289 - 300.
- Su, J.-F., Qiu, J., & Schlangen, E. (2013). Stability investigation of self-healing microcapsules containing rejuvenator for bitumen. *Polymer Degradation and Stability*, 1205 - 1212.
- Su, J.-F., Qiu, J., Schlangen, E., & Wang, Y.-Y. (2014). Experimental investigation of self-healing behavior of bitumen/microcapsule composites by a modified beam on elastic foundation method. *Materials and Structures*, 4067 - 4076.
- Su, J.-F., Qiu, J., Schlangen, E., & Wang, Y.-Y. (2015). Investigation the possibility of a new approach of using microcapsules containing waste cooking oil: In situ rejuvenation for aged bitumen. *Construction and Building Materials*, 83 - 92.
- Su, J.-F., Wang, X.-Y., Wang, S.-B., Zhao, Y.-H., Zhu, K.-Y., & Yuan, X.-Y. (2011). Interface stability behaviors of methanol-melamine-formaldehyde shell microPCMs/epoxy matrix composites. *Polymer Composites*, 810 - 820.
- Swapan Kumar Ghosh. (2009). *Self - Healing Materials*. Weinheim: WILEY-VCH.
- Tabakovic, A., & Schlangen, E. (2015). Self-Healing Technology for Asphalt Pavements. *Advances in Polymer Science*, 1 - 22.

- Tabatabaee, N., & Shafiee, M. H. (2012). Effect of organoclay modified binders on fatigue performance. *7th RILEM international conference on cracking in pavements*. Delft, The Netherlands: RILEM Bookseries.
- Talaiekhosani, A., Keyvanfar, A., A. S., Andalib, R., Majid, M. A., Fulazzaky, M. A., . . . Haidar, H. (2014). A Review of Self-healing Concrete Research Development. *Journal of Enviromental Treatment Techniques*, 1-11.
- Talaiekhosani, A., Keyvanfar, A., Andalib, R., Samadi, M., Shafaghat, A., Kamyab, H., . . . Hussin, M. W. (2013). Application of *Proteus mirabilis* and *Proteus vulgaris* mixture to design self-healing concrete. *Desalination and water treatment*, 3623 - 3630.
- Toohey, K. S., Sottos, N. R., Lewis, A. L., Moore, J. S., & White, S. R. (10 de June de 2007). *nature.com*. Obtenido de Self-healing materials with microvascular networks: <https://www.nature.com/articles/nmat1934>
- Torres, O. F. (2018). Condiciones físico - geográficas que determinan el tiempo y el clima sobre el territorio colombiano. *La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia*, 20 - 21.
- U. K. Gollapudi, C. L. (1995). A new method for controlling leaching through permeable channels. *Chemosphere*, 695 - 705 .
- Wang, J., Dewanckele, J., Cnudde, V., Vlierberghe, S. V., & Belie, W. V. (2014). X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete. *CEMENT & CONCRETE COMPOSITES*, 289- 304.

- Wang, J., Tittelboom, K. V., Belie, N. D., & Verstraete, W. (2012). Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 532 - 540.
- White, S., Sottos, N., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., . . . Viswanathan, S. (2001). Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 794 - 817.
- WILEY-VCH. (2009). *Self Healing Materials - Fundamentals, Design Strategies, and Applications*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.
- Wu, M., Johannesson, B., & Geiker, M. (2012). A review: Self-healing in cementitious materials and engineered. *Construction and Building Materials*, 571 - 583.
- Wu, M., Johannesson, B., & Geiker, M. (2012). A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 571 - 583.
- Wu, S., Mo, L., Shui, Z., & Chen, Z. (2005). Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers. *Carbon*, 1358 - 1363.
- Wu, S., Zhang, Y., & Chen, M. (2010). Research on mechanical characteristics of conductive asphalt concrete by indirect tensile test. *Proceedings of the 4th international conference on experimental mechanics*. SPIE.
- Wu, S.-p., Liu, X.-m., Ye, Q., & Li, N. (2006). Self-monitoring electrically conductive asphalt-based composite containing carbon fillers. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 512 - 516.

Zhang, H., Wu, X. H., & Wang, X. L. (2011). Conductivity mechanism of asphalt concrete with the PANI/PP compound conductive fiber. *Material Science Forum*, 69 - 73.

Zwaag, S. v. (2010). Routes and mechanisms towards self-healing behavior in engineering materials. *The Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 227 - 236.

Zwaag, v. d. (2007). *Self Healing Materials - An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*. The Netherlands : Springer.