



VIGILADA MINEDUCACIÓN

**AVANCES TECNOLÓGICOS PARA LA AUTORREPARACIÓN DE GRIETAS
PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS**

Jennifer Mayerly Ospina Gomez

Código: 10481715038

Universidad Antonio Nariño

Programa ingeniería civil

Facultad de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2021



AVANCES TECNOLÓGICOS PARA LA AUTORREPARACIÓN DE GRIETAS PARA MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE PAVIMENTOS RÍGIDOS

Jennifer Mayerly Ospina Gomez

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero civil

Director:

Ingeniero Edison Osorio y UDCII

Línea de investigación:

Avances tecnológicos para la autorreparación en estructuras de concreto.

Universidad Antonio Nariño

Programa ingeniería civil

Facultad de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2021



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
2.1. GENERAL	2
2.2. ESPECÍFICOS	2
MARCO CONCEPTUAL	2
3.1. ORIGEN DE LAS CARRETERAS	2
3.2. ORIGEN DE LOS PAVIMENTOS EN COLOMBIA	3
3.3. PAVIMENTO	3
3.4. COMPOSICIÓN DE UN PAVIMENTO RÍGIDO	6
3.5. USO DE PAVIMENTO RÍGIDO	7
3.6. MATERIALES MÁS IMPORTANTES	8
3.7. CRITERIOS DE DISEÑO	10
3.8. MÉTODOS DE DISEÑO PARA PAVIMENTO RÍGIDO	12
3.8.1. Método de diseño AASHTO (American Association Of State Highway And Transportation Officials)	12
3.8.2. Diseño por Método PCA (Portland Cement Association)	19
3.8.3. Guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá (IDU)	22
3.9. FALLAS DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS	24
3.9.1. Las grietas	25
3.9.2. Deterioro de juntas	26
3.9.4. Otros deterioros	28
3.10 AVANCES TECNOLÓGICOS	28
4. ESTADO DEL CONOCIMIENTO	31
4.1. AUTORREPARACIÓN AUTÓGENA	36
4.2. AUTORREPARACIÓN AUTÓNOMA.	40
4.3. Otros.	46
5. PRESUPUESTO MATERIALES	47
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	49
7. CONCLUSIONES	52
8. AGRADECIMIENTOS	54
9. ANEXO ARTÍCULO	54
10.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54



RESUMEN

Este proyecto fue realizado debido a la falta de estudios en español, sobre el tema de tecnologías autorreparables, adicionalmente con el estado actual de las vías Colombianas, debido al agrietamiento provocado por factores externos e internos, presentan una vida útil corta; Por esta razón, se buscan alternativas para aumentar su durabilidad, mitigar su agrietamiento y mantener o incrementar sus propiedades mecánicas. De esta manera, se proponen alternativas que emplean agentes autorreparables como el autógeno o autónomo, también se presentan algunos materiales implementados para el sellado de grietas y aumento de su durabilidad. Esto permitió establecer sus costos aproximados adicionando sus ventajas y desventajas, concluyendo que, es un tema el cual debe ser más investigado.

Palabras clave

Tecnologías autorreparables; autógena; autónoma; concreto; propiedades mecánicas; agrietamiento;

ABSTRACT

This project was carried out due to the lack of studies in Spanish, on the subject of self-repairing technologies, additionally with the current state of the Colombian roads, due to cracking caused by external and internal factors, they present a short useful life; For this reason, alternatives are sought to increase its durability, mitigate its cracking and maintain or increase its mechanical properties. In this way, alternatives using self-repairing agents such as autogenous or autonomous are proposed, and some materials implemented for crack sealing and increasing their durability are also presented. This allowed to establish their approximate costs adding their advantages and disadvantages, concluding that, it is a topic which should be further investigated.

Keywords:

self-repairing technologies; autogenous; autonomous; concrete; mechanical properties; cracking;

1. INTRODUCCIÓN

En la evolución de materiales para pavimentos se destaca la producción de concretos, siendo uno de los más implementados en el mundo, puesto que su composición cuenta con gran disponibilidad en materia prima, también es un material resistente y duradero a comparación de otros, sin embargo debido a sus características de tracción puede provocar la aparición de agrietamientos en cualquier etapa de su vida, adicional se pueden presentar otras fallas las cuales pueden estar atribuidas al diseño, climas severos, condición del suelo o exposición a agentes externos. Adicionalmente las microgrietas debido a su tamaño son difíciles de detectar, y pueden llegar a ocasionar grandes grietas; Por esto se han venido realizando investigaciones sobre procesos para autorreparar las microgrietas usando variados mecanismos y tecnologías para cumplir con este objetivo, además no se pierden las propiedades mecánicas del material aumentando su vida útil.

Este trabajo presenta una breve descripción sobre el origen de los pavimentos, se indican los tipos de pavimentos, su composición, los criterios mínimos y tres metodologías para el diseño de los pavimentos rígidos, además presenta las patologías del pavimento y se hace una recopilación de los avances tecnológicos implementados en los últimos años, estos pueden dividirse en autoreparación autónoma, autógena y mecánica, cada uno implementa distintos agentes que permiten el sellado de las microgrietas, con el fin de verificar la viabilidad de la implementación de alguna de estas tecnologías se realizan cotizaciones con ejemplos de algunos casos experimentales. Finalmente se presentan las ventajas y desventajas del uso de estas tecnologías.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

- Determinar los avances tecnológicos para el diseño de pavimentos rígidos autorreparables caracterizados por su mayor vida útil y eficiencia.

2.2. ESPECÍFICOS

- Recopilación de información de las tecnologías y diseños novedosos de la mezcla, aplicable para el pavimento rígido autorreparable.
- Analizar la información actualizada y novedosa enfocada en el avance tecnológico de pavimentos rígidos autorreparables.
- Identificar los métodos más adecuados y que sean sostenibles en el diseño de pavimentos rígidos autorreparables.

3. MARCO CONCEPTUAL

3.1. ORIGEN DE LAS CARRETERAS

Se remonta en el Imperio Hilita, región del Oriente medio, alrededor del año 3000 BCE, eran caminos elaborados en roca, ya que se consideraba en esa época un material muy resistente, además la carretera más antigua tenía una gran distancia y estaba ubicada en la Carretera Real Persa (Blanco, 1987). Siguiendo con la secuencia entre los años 700-600 BCE aparecen carreteras más modernas, en donde se implementaban cementos naturales con tres capas de piedras encajadas en la parte superior, con espesores de 90 a 120 cm (Blanco, 1987).

En el año 300 BCE aparecen las primeras carreteras llamadas calzadas las cuales son elaboradas con calcis o piedra caliza, dicho evento fue presenciado en Roma y para el año 1607 en Francia, aparece el primer código de carreteras donde presentan los métodos de construcción y mantenimiento de caminos de la calzada (Hernández, 2019). Luego en 1716 el ingeniero Pierre Marie Jérôme deduce que las cargas en la vía no se producen en la capa de calzada sino en el suelo, por lo cual propone un sistema nuevo de construcción mejorando el soporte con una capa espesa

de piedras uniformes, y otra capa por una piedra más pequeña, después utilizando una partícula más fina John Loudon en 1820 crea una capa de rodadura densa e impermeable (Hernández, 2019).

Para el año 1870 aparece el primer pavimento asfáltico realizado por Edmund Desmedt en Estados Unidos, en el estado de New Jersey, seguido de esto en 1891 aparece el primer pavimento de concreto realizado por George Bartholomew en Estados Unidos en el estado de Ohio (Hernández, 2019; Blanco, 1987).

3.2. ORIGEN DE LOS PAVIMENTOS EN COLOMBIA

De acuerdo con el documento elaborado por el ingeniero Londoño la dictadura de Rafael Reyes crea el ministerio de obras públicas el 7 de enero de 1905, con el fin de direccionar las vías nacionales, líneas férreas y las canalizaciones de los ríos (Londoño, s.f.). Permitiendo clasificar las vías nacionales, departamentales y municipales, además en el mandato de Reyes (1904-1909) se construyeron 207 Km de carreteras y 572 Km de caminos herradura (Redondo, 2012; Londoño, s.f.).

Después los caminos herradura pasan a ser pavimentos, siendo los primeros pavimentos que se construyeron en el centro de Bogotá y el parque plaza Bolívar entre los años 1890 y 1893, también un 88% de carreteras en Cundinamarca y Boyacá en 1912, estas obras no obtuvieron los resultados esperados, ya que se contaba con poca información técnica (Redondo, 2012). Por lo tanto, se planteó el primer plan vial Nacional en la ley 12 de 1949 y para la década de los 50 se realizaron las primeras construcciones con pavimento de concreto (Redondo, 2012).

3.3. PAVIMENTO

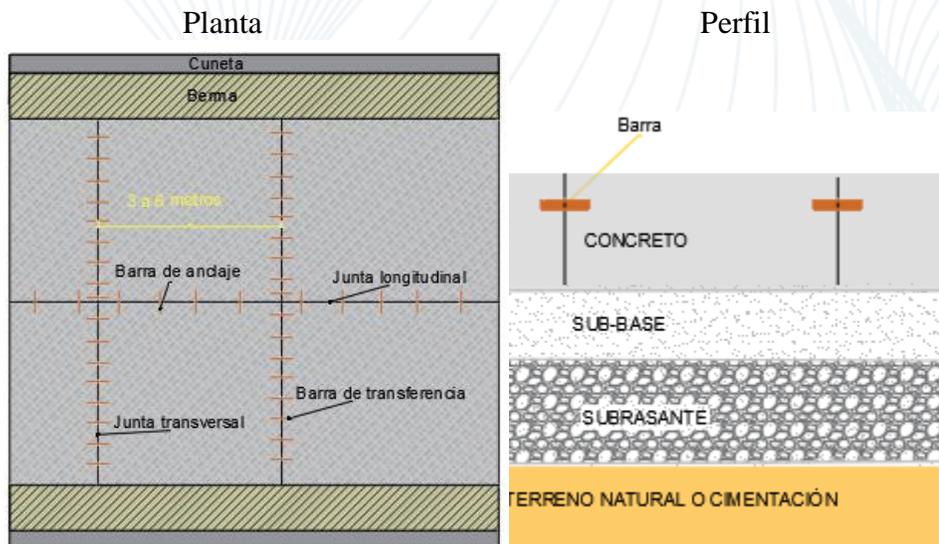
El pavimento se puede definir de acuerdo a lo aprendido previamente en clases como la superestructura de un suelo artificial, construida sobre un conjunto de capas granulares, simple o tratada, que van en la parte de la cimentación conocida como la subrasante y la capa de rodamiento, las cuales son capaces de soportar cargas rodantes y distribuir los esfuerzos evitando la producción de deformaciones (Becerra, 2013; Villareal, 2008).

Los pavimentos que se han dado históricamente se pueden clasificar en: pavimentos rígidos, pavimentos flexibles y pavimentos articulados. Siendo el pavimento rígido el tipo a evaluar y del cual se hablará en todo el documento.

El pavimento rígido fue nombrado así por las propiedades de su carpeta la cual consiste en una capa de rodadura en loza de concreto hidráulico, la cual se compone por cemento hidráulico, agregados, aglomerantes y algunos con aditivos (Becerra, 2013). También se pueden construir con juntas de contracción, juntas de expansión, juntas de clavijas o sin juntas. Además existen tres tipos de pavimentos rígidos, los cuales consisten en los de concreto simple, losa de concreto reforzado y losa continuamente reforzada (Invias, 2006; Calla, 2015; Brockenbrough, 2009), estos están compuestos por:

- Losa de concreto simple: Implementa juntas de contracción transversal, en general mantienen intervalos de 3 a 6 m, también se colocan las barras de anclaje en juntas transversales y longitudinales en dirección perpendicular, estas barras son pequeñas y de acero liso (Invias, 2006; Calla, 2015); con el fin de controlar fisuras, enclavamiento y transferir las cargas de tráfico a través de la losa (Fick et al., 2012). En la figura 1 se puede observar el esquema de la losa de concreto simple.

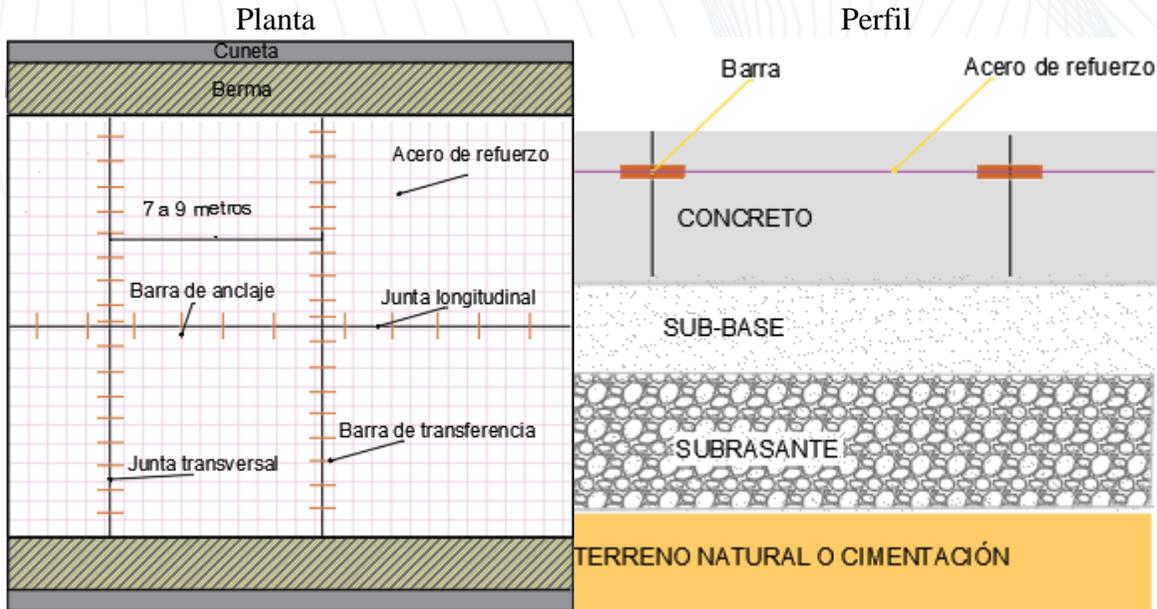
FIGURA 1. Losa de concreto simple



Nota. La figura muestra el esquema y partes de una losa de concreto simple. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Invias (2006).

→ Losa de concreto reforzado: Implementa juntas transversales con intervalos entre 7 a 15 m (Invias, 2006) ó de 7 a 9 m (IDU, 2013; Calla, 2015), se utilizan sistemas de juntas de contracción, longitudinales y transversales, adicionalmente acero de refuerzo, el cual es una malla de acero electro soldada o malla de varillas de acero, con el fin de mantener unidas las grietas transversales que se puedan formar (IDU, 2013; Calla, 2015). En la figura 2 se puede observar la losa de concreto reforzado.

FIGURA 2. Losa de concreto reforzado

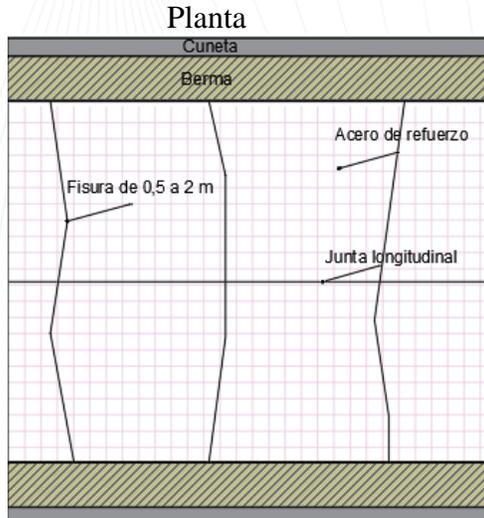


Nota.

La figura muestra el esquema y partes de una losa de concreto reforzado. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Invias (2006).

→ Losa continuamente reforzado: No requiere juntas de contracción, ya que es similar a un entrepiso y lleva acero de refuerzo en la parte inferior y/o superior (Invias, 2006), por lo cual genera fisuras transversales de hasta 0.5 milímetros y pueden aparecer cada 0.6 a 2 metros entre fisura, se recomiendan barras No. 5 y No. 6 (Jaimes, 2020), se puede observar la figura 3.

FIGURA 3. Losa continuamente reforzados



Nota. La figura muestra el esquema y partes de una losa de concreto continuamente reforzado. Fuente: Elaboración propia con base en datos de Invias (2006).

3.4. COMPOSICIÓN DE UN PAVIMENTO RÍGIDO

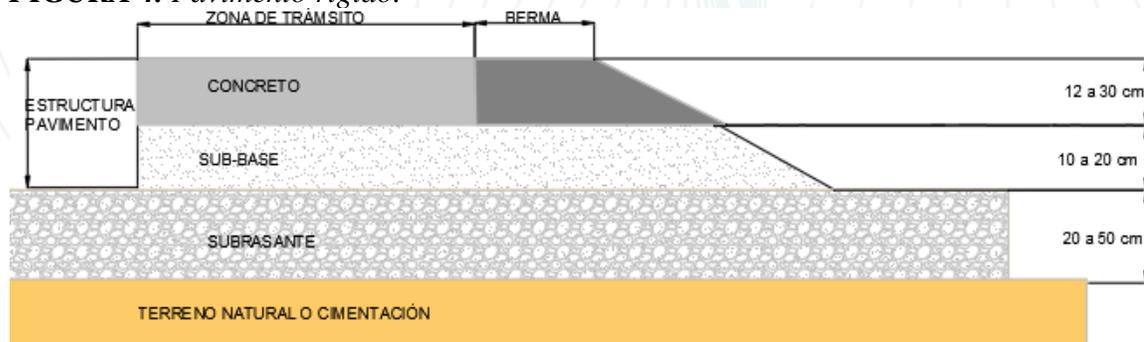
Como se había mencionado anteriormente el pavimento rígido está conformado por capas granulares y la de rodadura las cuales se describen a continuación:

- Terreno natural o de cimentaciones: Es el terreno afectado por la construcción de la vía y soporta las cargas de la estructura del pavimento y el tránsito. Dependiendo si el suelo es expansivo o tiene acción de las heladas y bombeo se establece la subrasante (Fick et al., 2012).
- Cuerpo del terraplén: Con el fin de dar la altura necesaria para alojar el drenaje de las obras (Botella, 2017).
- Capa subrasante: Tiene diversas funciones como resistir y recibir cargas de tránsito transmitido por la capa de pavimento, también evita la contaminación del pavimento con el terraplén o terreno natural que sea arcilloso, debidamente ha nivelado y compactado, ya que de este dependen algunas decisiones (Fick et al., 2012).
- Sub-base: Proporciona una capa uniforme que sirve de drenaje, estabilidad, apoyo para la losa y facilita su implementación, también para proteger a la losa de los cambios volumétricos y elasticidad (Robles, 2018). También existen tres tipos de sub-base con el fin de equilibrar el drenaje y la estabilidad, las cuales son granular, modificada y relleno especial (Grove, 2006).

- ◆ Sub-base granular es la más drenable, compuesta de material granular y no brinda soporte (Grove, 2006).
 - ◆ Sub-base modificada su drenaje es moderado, compuesto por más partículas trituradas y brinda más estabilidad (Grove, 2006).
 - ◆ Relleno especial este genera más estabilidad y soporte, pero drena menos, compuesta por concreto triturado o piedra caliza triturada, o una mezcla de grava, arena y tierra, opcional la piedra triturada (Grove, 2006).
- Losa: Es la superficie de rodamiento, donde soporta y transmite el nivel de cargas adecuado que se aplica. Se diseñan bajo dos criterios erosión y fatiga (Londoño, s.f).

Lo anterior se puede observar en la figura 4 donde se indican los rangos de espesores de cada capa del pavimento rígido.

FIGURA 4. Pavimento rígido.



Nota: En la figura se puede ver espesores y ubicación de las capas de un pavimento rígido. Fuente: Elaboración propia datos tomados de Barajas y Buitrago (2017).

3.5. USO DE PAVIMENTO RÍGIDO

El uso de este material es sumamente importante, ya que generan un menor impacto ambiental que los asfálticos y en 40 años se ha podido aumentar hasta en un 12% (ASCP, 2020), siendo el pavimento 100% más reciclable porque suelen tener hasta un 20% de material reciclado (Verían et al., 2013; (Van Dam et al., 2012). Para la elección de este pavimento de acuerdo con el manual de diseño Invias (2008), se deben tener en cuenta los aspectos técnicos, económicos del país o de la zona, fuente de materiales, ahorro de energía, distancia de acarreo, entre otros factores que pueden variar la elección del pavimento (Invias, 2008).

Referente a los aspectos técnicos se deben tener en cuenta las ventajas y desventajas del concreto, la calidad de los agregados, la subrasante y el clima, recordando que este

pavimento reduce el impacto en las islas de calor que se producen en zonas urbanas, también es importante resaltar que es más recomendable aplicar en suelos con baja capacidad portante (CCANZ, 2013; Rens, 2009).

En cuanto a los aspectos económicos se debe evaluar el costo de construcción, el mantenimiento, la obtención de los materiales, maquinaria, mano de obra y otros criterios particulares como los imprevistos.

3.6. MATERIALES MÁS IMPORTANTES

La construcción del pavimento involucra varios materiales, los más importantes se describen a continuación:

1. Concreto: Es la unión entre materiales aglutinadores o de pasta, agregados y aditivos. En general el agregado conforma entre 65 al 75% del volumen total del concreto, la pasta de 25 a 35% donde esta se divide en cemento de 8 a 16%, el agua de 17 a 19% y aire de 1 - 2% de la pasta (Rodon y Reyes, 2015).

Para determinar la dosificación del concreto se debe tener en cuenta la tabla 1, también el volumen de la losa de concreto y la resistencia que debe tener el concreto para luego proceder a calcular por medio de las ecuaciones 1 a 4. Los desperdicios son un porcentaje del material que va de 1 a 10%.

TABLA 1. Dosificación de concreto en la obra

TIPO DEL CONCRETO	RESISTENCIA PSI	MATERIALES			
		CEMENTO (Kg)	ARENA (m3)	GRAVA (m3)	AGUA (L)
1:2:2	3500	420	0.67	0.67	220
1:2:3	3000	350	0.56	0.84	180
1:2:4	2500	300	0.48	0.96	170
1:3:4	2000	260	0.63	0.84	170
1:3:6	1500	210	0.5	1	160

Nota: Adecuación propia con base en datos de Morales (2019).

$$\text{Sacos de Cemento (50 Kg), } S_c = (\text{cemento(kg)}/50) * \text{volumen losa} * \text{desperdicio} \quad (1)$$

$$\text{Volumen arena (m}^3\text{), } V_a = \text{arena(m}^3\text{)} * \text{volumen losa} \quad (2)$$

$$\text{Volumen grava (m}^3\text{), } V_g = \text{grava(m}^3\text{)} * \text{volumen losa} \quad (3)$$

$$\text{Volumen agua (m}^3\text{), } w = \text{agua(L) * volumen losa} \quad (4)$$

- Suelo de la subrasante: Si se tienen suelos con CBR menores del 5% se recomienda implementar la tabla 2, donde recomienda espesores para mejorar la capacidad del suelo con materia rajón o material similar, con el fin de cumplir con las especificaciones técnicas del material. Siendo 5% el valor mínimo de CBR el cual soporta las capas del proceso constructivo del pavimento.

TABLA 2. *Espesores recomendados para CBR menores de 5%*

CBR DE SUBRASANTE (%)	ESPEJOR DE SUSTITUCIÓN (CM)
<1	mínimo 60
1	55
2	35
3	25
4	15

Nota: Adecuación propia con base en datos de Rodon y Reyes (2015).

- La base granular se ubica en la parte superior de la subrasante o el terraplén. Si el CBR de arena se encuentra entre 25 a 30% se debe realizar el ensayo de azul de metileno o puede ser de agregados pétreos. Se estiman espesores entre 10 a 25 cm (Rodon y Reyes, 2015; Invias, 2008).
- Juntas: Son discontinuidades en el pavimento rígido que pueden ir transversales y longitudinales, llevan pasadores, dovelas o barras de transferencia, sus dimensiones se observa en la tabla 3.

TABLA 3. *Dimensiones para los pasadores*

ESPEJOR DE LOSA	DIÁMETRO DEL PASADOR (PULGADAS)	LONGITUD DEL PASADOR (cm)	SEPARACIÓN ENTRE CENTROS DE BARRAS (cm)
14-15	3/4	35	30
16-18	7/8	35	
19-20	1	35	
21-23	1 1/8	40	
24-25	1 1/4	45	
26-28	1 3/8	45	
29-30	1 1/2	50	

Nota: Adecuación propia con base en datos de Rodon y Reyes (2015).

- Sello de juntas: Su función es no permitir el acceso de agua y de partículas sólidas a las juntas, para el sellado se emplea una pistola de calafateo o bombas para canecas con productos sellantes, los cuales deben ser resistente a la fatiga térmica, de carga, de esfuerzo cortante, el desgaste por abrasión o fricción, el envejecimiento y los ataques químicos. La mezcla sellante debe ser plástica, como cauchos, siliconas y asfalto, se realiza a los 21 y 28 días de edad del concreto, a temperaturas superiores a 5° C y no debe haber circulación del tránsito antes de realizar el sellado (Rodon y Reyes, 2015).

3.7. CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios para el diseño de un pavimento rígido, consisten en la determinación de la categoría de la vía y el tránsito promedio diario. También se debe tener en cuenta, la normativa de cada capa del pavimento rígido como se observa en la tabla 4. Otros criterios importantes son las juntas, las cuales permiten controlar los esfuerzos presentes en el concreto, la transferencia de cargas entre losas y confinamiento lateral que puede ser por dovelas o bermas (Invias, 2008).

TABLA 4. Normas y ensayos por capa

CAPA	DESCRIPCIÓN	NORMA
SUBRASANTE	Relación de soporte del suelo en el laboratorio CBR	INV E 148-07

	Indice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras	INV E 230-07
SUB-BASES	Artículo base granular	INV 330-07
	Artículo base estabilizada con cemento	INV 341-07
CONCRETO	Resistencia de la flexión del concreto método de la viga simple cargada en los tercios de la luz	INV E414-07

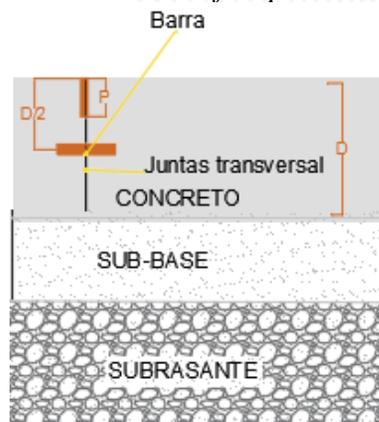
Nota: Elaboración propia con base en datos de Invias (2008).

Se debe recordar que, si las cargas estimadas en el diseño aumentan, “la zona plástica crece hasta llegar a la resistencia última del medio continuo” (Badillo & Rodríguez, 2004).

Los criterios de diseño de pavimentos rígidos dependen de las siguientes variables.

- El tránsito: Es la variable de vehículos que transitan por un lugar, donde se evalúan factores como los ejes, la tasa de crecimiento, factor camión o carril entre otros, que intervienen dependiendo del método de diseño que se seleccione (Rodón y Reyes, 2015; Invias, 2008).
- El espesor del concreto (D): Es el cálculo esperado del diseño del pavimento, ya que depende de las cargas por eje esperadas en el carril de diseño, también el espesor oscila entre 18 y 30 cm; El sello debe tener un ancho de 3.8 mm y la profundidad del sello (P) oscila en $(D/6 < P < D/4)$; Las barras deben estar a $D/2$ del espesor del concreto como se observa en la figura 5 (Robles, 2018).

FIGURA 5. Perfil típico de una estructura de pavimento rígido con juntas.



Nota: En la figura se observa las juntas, sellado de juntas, y ubicación. Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Rodon y Reyes, 2015).

- Servicialidad: Es la capacidad del pavimento de servir dependiendo de su tipo de tráfico (Robles, 2018).

- Transferencia de carga (J): Es la capacidad que tiene una losa para transmitir fuerzas cortantes a las losas adyacentes (Francia & Hilton, 2012).
- Propiedades del concreto: Se determinan a los 28 días, por medio de la AASHTO se debe diseñar bajo el módulo de rotura y módulo elástico (Rodon y Reyes, 2015), y por medio de la PCA se debe diseñar bajo los criterios de erosión y fatiga (Londoño, s.f).
- La subrasante: Se caracteriza por su módulo de reacción de la subrasante (K), la cual se determina según las condiciones del suelo y la capacidad de soporte (Jaimes, 2020).
- Condiciones ambientales y drenaje: Se evalúa por medio del coeficiente de drenaje para las capas de apoyo para la losa. También se determina por la calidad de drenaje y porcentaje de tiempo que dura expuesta a la saturación la estructura (Rodon y Reyes, 2015).
- Confiabilidad (R): Es un factor estadístico que influye en el comportamiento del pavimento y debe estar entre 50 y 80% para zonas urbanas con un tipo de carretera local (AASHTO, 1993; Rodon y Reyes, 2015).
- Las dimensiones de los pasadores y barras de anclaje: Se determinan de acuerdo a las condiciones estipuladas sin exceder las dimensiones de la losa de 6 metros (Francia y Hilton, 2012).

3.8. MÉTODOS DE DISEÑO PARA PAVIMENTO RÍGIDO

Actualmente existen varios métodos de dimensionamiento para pavimentos rígidos, basados en modelos matemáticos y experiencia. En Colombia se elaboraron guías de diseño desarrolladas en Invias y el IDU, donde implementan y adecuan métodos de diseño propuestos por AASHTO en 1993 y PCA en 1984, siendo los métodos empíricos universales, cada uno con características y resultados diferentes (Jaimes, 2020).

3.8.1. Método de diseño AASHTO (American Association Of State Highway And Transportation Officials)

Este método de AASHTO de 1993 involucra la revisión del diseño sobre capas, la erosión de la subbase, confinamiento y tránsito, también tiene en cuenta factores como el error estándar combinado, la diferencia de serviciabilidad y el coeficiente de drenaje (González & Vanegas, 2016). Este diseño de pavimentos rígidos propone evitar posibles deterioros acelerados y la

disminución de la vida útil. Una vez establecidas las variables se implementa la ecuación general (ver figura 6).

FIGURA 6. Ecuación para determinar el ancho del concreto

$$\log(W_{18}) = Z_r \times S_o + 7.35 \times \log(D+1) - 0.06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.5-1.5}\right)}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 \times P_i) \times \log\left[\frac{MR \times C_d \times (D^{0.75} - 1.132)}{215.63 \times J \left[D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{K}\right)^{0.25}} \right]} \right]$$

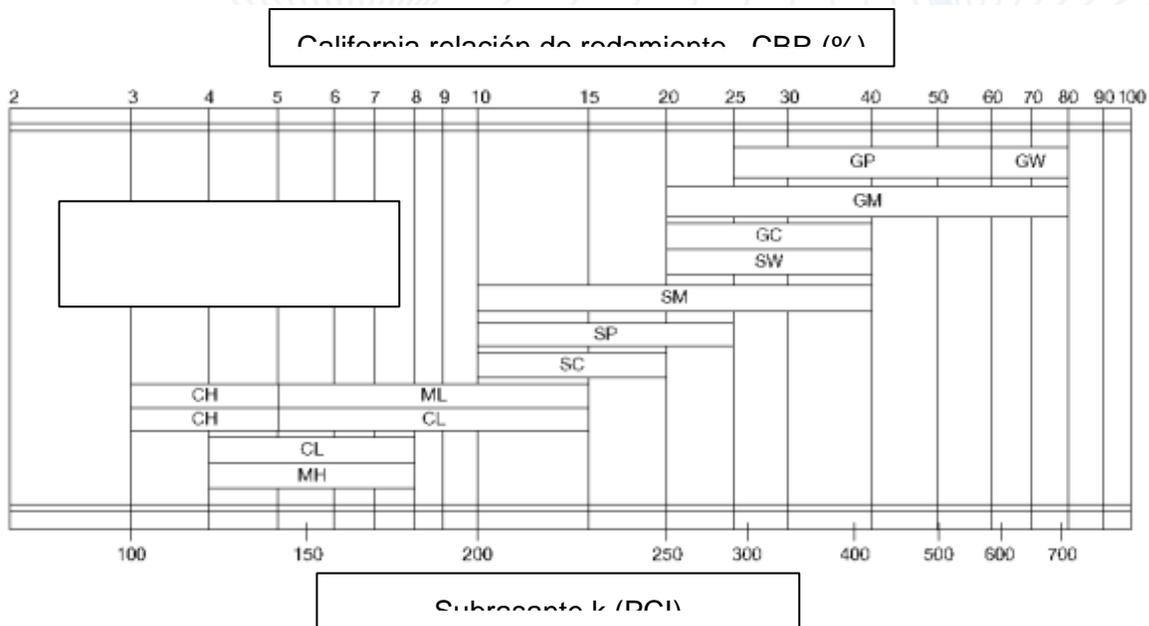
Labels in the diagram:
 - Z_r : Tráfico
 - S_o : Error estándar combinado
 - D : Espesor
 - ΔPSI : Desviación normal estándar
 - P_i : Serviciabilidad Pt
 - MR : Módulo de rotura
 - C_d : Coeficiente de drenaje
 - J : Módulo de transferencia de carga
 - E_c : Módulo de elasticidad
 - K : Módulo de reacción

Nota: En la figura se observa la ecuación de la AASHTO y sus partes. Fuente: Adecuación propia con base en datos de Rodón y Reyes (2015).

A continuación se describen las variables presentadas en la figura anterior.

1. Resistencia a la subrasante (K): Se determina mediante el módulo de efectividad de relación a la subrasante por medio del ensayo de CBR, dando así la relación de valores de CBR y K como se observa en la figura 7.

FIGURA 7. Valores CBR y K de la Subrasante



Nota: En la figura se analiza la relación del CBR y K. Fuente: Jaimes (2020).

Sin embargo, se obtienen las constantes de la AASHTO de 1993 como se indica en la tabla 5 para determinar el módulo de relación de la subrasante cuando no se obtiene información geotécnica del sitio.

TABLA 5. Valores de K

TIPO DE SUELO	SOPORTE	RANGO DE K (MPa/m)
Subbase tratada	Muy alto	68.49 - 109.59
Arenas y mezcla de arena con grava, poca presencia de granos finos	Alto	49.31 - 60.27
Arenas, mezcla de arenas con grava, con presencia de limo y arcillas	Medio	35.62 - 46.57
Grano fino, limo y arcilla predominan	Bajo	20.55 - 32.88

Nota: Adecuación propia con base en datos de Salazar (2015)

- Propiedades del concreto: Se deben obtener los parámetros mecánicos, los cuales son medidos a los 28 días de fundir los especímenes y así determinar el módulo elástico y módulo de rotura (Rodon y Reyes, 2015).

→ Módulo de rotura: Está dado por la medida de la resistencia a la flexión, este se determina de acuerdo a la norma NTC 2871 (ASTM C78) (Calla, 2015; Jaimes, 2020). Se debe promediar el resultado de los ensayos por medio de la ecuación 5 (Francia & Hilton, 2012). En la tabla 6 se observa la recomendación de módulos de rotura según el tipo de vía.

TABLA 6. Módulo de rotura recomendado

TIPO VÍA	MR (Kg/cm²)
Autopista	48
Carreteras	48
Zona industrial	45
Urbanas principales	45
Urbanas secundarias	42

Nota: Adecuación propia con base en datos de AASHTO (1993).

$$MR_{prom} = M_{especificado} + Z_r * desviación\ estándar\ del\ MR \quad (5)$$

Los valores comunes para la desviación estándar del módulo de rotura se encuentran en la tabla 7 y la desviación normal estándar en la tabla 8.

TABLA 7. Dato común en la desviación estándar

DESVIACIÓN ESTÁNDAR.	PROMEDIO (%)
Concreto pre-mezclado	9
Mezclado central	7.5

Nota: Adecuación propia con base en datos de AASHTO (1993).

TABLA 8. Desviación normal estándar en función de la confiabilidad

CONFIABILIDAD	Zr	CONFIABILIDAD	Zr
50	-0.000	93	-1.476
60	-0.253	94	-1.555
70	-0.524	95	-1.645
75	-0.674	96	-1.881
80	-0.841	97	-2.054
85	-1.037	98	-2.054
90	-1.282	99	-2.327
91	-1.340	99.9	-3.097
92	-1.405	99.9	-3.750

Nota: Adecuación propia con base en datos de AASHTO (1993).

- Módulo de elasticidad: Se determina por medio de los ensayos NTC 4025 (ASTM C469) (Rodon y Reyes, 2015; Botella, 2017), donde plantean la ecuación 6, siendo $f'c$ su resistencia a la compresión.

$$E_c = 21000 * f'c^{1/2} (kg/cm^2) \quad (6)$$

3. Determinar el coeficiente de drenaje del pavimento: Teniendo en cuenta el porcentaje de tiempo al cual está expuesto el pavimento a la humedad (este dato depende de la precipitación media anual) y la calidad del drenaje como se observa en la tabla 9 para un drenaje del 50% del agua.

TABLA 9. *Dato común en la desviación estándar*

CALIDAD DEL DRENAJE	PORCENTAJE DEL TIEMPO QUE DURA EXPUESTO A HUMEDAD EL PAVIMENTO			
	Menos del 1%	1% - 5%	5% - 25%	Más del 25%
Muy malo (Nunca)	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80 - 0.70	0.70
Pobre (1 mes)	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90 - 0.80	0.80
Regular (1 semana)	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00 - 0.90	0.90
Bueno (1 día)	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10 - 1.00	1.00
Excelente (2 horas)	1.25 - 1.20	1.20 - 1.15	1.15 - 1.10	1.10

Nota: Adecuación propia con base en datos de AASHTO (1993).

4. Servicialidad: Es la capacidad del pavimento de servir dependiendo de su tipo de tráfico (Robles, 2018) y se mide de 0 a 5 siendo 5 excelente pavimento, mientras que 0 es intransitable. Por otro lado, el índice de servicialidad se debe evaluar de acuerdo a la ecuación 3, donde se tiene en cuenta el inicio (P_o) y final (P_f) de servicialidad del pavimento, donde P_o oscila entre 4.0 y 4.2 (Rodón y Reyes, 2015), considerando un estado bueno de la vía y para P_f se determina de acuerdo al tipo de vía como se muestra en la tabla 10. La pérdida de servicialidad se calcula por la ecuación:

$$\Delta PSI = P_o - P_f \quad (7)$$

TABLA 10. Servicialidad final P_f

TIPO VÍA	SERVICIALIDAD FINAL (Pf)
Autopista	2.5 - 3
Carreteras	2 - 2.5
Zona industrial	1.8 - 2.25
Urbanas principales	1.8
Urbanas secundarias	1.5

Nota: Adecuación propia con base en datos de AASHTO (1993).

5. La confiabilidad: Es un factor estadístico que influye en el comportamiento del pavimento, se establece de acuerdo al uso de la vía como se indica en la tabla 11.

TABLA 11. *Dato común en la desviación estándar*

TIPO VÍA	CONFIABILIDAD R (%)	
	URBANO	RURAL
Autopista	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 99
Carreteras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Nota: Adecuación propia con base en datos de AASHTO (1993).

6. Tránsito: Se caracteriza por el número de ejes en toneladas que circulan y el periodo de diseño (Rodon y Reyes, 2015). Para elaborar la caracterización del tránsito se requiere un informe del tránsito, con número de ejes equivalentes a 8.2 o 13 toneladas que circulan en el carril, entre otros aspectos. Para este cálculo se implementa la ecuación:

$$N = (TPD * \frac{k_1}{100} * \frac{k_2}{100} * 365 * FC) * (\frac{(1+r)^n - 1}{in(1+r)}) \quad (8)$$

Donde:

- TPD: Es el tránsito promedio diario del número de vehículos Automóviles, Buses y Camiones que circulan por una vía en un día.
- k_1 : Es el porcentaje de vehículos pesados (buses y camiones) que transitan en el lugar.
- k_2 : Es el factor carril, se asigna dependiendo del número de carriles como se muestra en la tabla 12.

TABLA 12. *Factor carril*

NÚMERO DE CARRILES.	FACTOR DE CARRIL.
---------------------	-------------------

1	1
2	0.8 a 1
3	0.6 a 0.8
4	0.5 a 0.75

Nota: Adecuación propia con base en datos de AASHTO (1993).

- r: Es la tasa de crecimiento anual de tránsito, se establece según el caso como se muestra a continuación:

TABLA 13. Valores de tasa de crecimiento

CASO	TASA DE CRECIMIENTO
Crecimiento normal	1 a 3%
Vías completamente saturadas	0 a 1%
Con tráfico inducido (3 a 5 años)	4 a 5%
Alto crecimiento (3 a 5 años)	mayor al 5%

Nota: Adecuación propia con base en datos de AASHTO (1993).

- n: Es el período de diseño en años, desde que entra en servicio hasta que finaliza (entre 20 a 40).
- FC (Factor camión) demostrado en la ecuación:

$$FC = \frac{\sum(\text{Cant.de cada tipo de camion} * \text{factor de equivalencia})}{\sum \text{Cant.de camion}} \quad (9)$$

- Factor equivalencia, demostrado en la ecuación:

$$fe = \left(\frac{q}{Po}\right)^4 \quad (10)$$

q: Carga de eje en tonelada

Para Eje Simple (2 neumáticos): $Po = 6.6$

Para Eje Simple (4 neumáticos): $Po = 8.2$

Para Eje Tándem (Doble): $Po = 15$

Para Eje Tridem (Triple): $Po = 23$

7. Coeficientes de transferencia de carga (J): Es la capacidad que tiene una losa para transmitir fuerzas cortantes a las losas adyacentes (Francia & Hilton, 2012). Para evaluarlo se debe tener en cuenta la distribución de cargas para evitar fallas en las juntas, y para determinar esa transmisión de carga (Rodon y Reyes, 2015), se representa en la tabla 14.

TABLA 14. *Evalúo de la distribución de cargas*

TIPO DE PAVIMENTO	TRANSMISIÓN DE CARGA	
	si	no
Dispositivos de transmisión de cargas		
Losa no reforzada o con juntas	2.5 a 3.1	3.6 a 4.2
Losa confinada	2.3 a 2.9	

Nota: Adecuación propia con base en datos de Rodon y Reyes (2015).

8. Determinar el espesor de la losa y refuerzo de acero, se debe tener en cuenta la figura 6 y el espesor de diseño debe estar alrededor de 13 a 25 mm (Brockenbrough, 2009).

3.8.2. *Diseño por Método PCA (Portland Cement Association)*

Este método se enfoca en un diseño empírico y mecánico, sus ecuaciones son propuestas por Westergaard en 1926 y los efectos de las bases por Burmister en 1945, entre otros colaboradores (Jaimes, 2020). El diseño se basa en el análisis de la fatiga (evita el agrietamiento) y el análisis de erosión (limita la deflexión) (Milla, 2017; PCA, 1984). Los criterios de diseño dependen de la selección del pavimento, el tipo de subbase, barras de transferencia y bermas; algunas de las variables para determinar los espesores de diseño según los criterios son:

- Erosión: Genera deformaciones críticas en las esquinas de las losas de pavimento cada vez que se genera una carga de eje vehicular (Huang, 2004). La correlación está dada por el trabajo representado en la ecuación 11, donde se relaciona el espesor de la losa (h) y el módulo de la subrasante (k) (AASHTO, 1993). De esta ecuación se parte para obtener la ecuación 12 la cual es el porcentaje de erosión con relación al número de repeticiones admisibles (N) y la carga esperada (Ne), donde C2 es 0.06 sin apoyo lateral y con apoyo lateral 0.94 (Londoño, s.f).

$$U = 268.7 * \frac{p^2}{hk^{0.73}} \quad (11)$$

$$\log N = 14.524 - 6.77(C1 U - 9)^{0.103} \quad (11.1)$$

$$C1 = 1 - [k/(500 * h)]^2 \quad (11.2)$$

$$\text{Erosión (\%)} = \Sigma \frac{C2 * Ne * 100}{N} \quad (12)$$

→ La fatiga: Cuando la losa no soporta los esfuerzos de flexiones (σ), debida al momento (M) y los esfuerzos cortantes se establece la ecuación 13, dada por el mecanismo de materiales tradicionales de acuerdo con la PCA, donde $y=h/2$ e I es el momento de inercia de la sección transversal (Londoño, s.f.).

$$\sigma x = M \frac{Y}{I} \quad (13)$$

1. Módulo de rotura del Concreto (MR): Es el mismo ensayo que proponen en la AASHTO de módulo de rotura sobre vigas y en Colombia se establecen valores de MR entre 38 kg/cm² a 45 Kg/cm² (Jaimes, 2020).
2. Módulo de reacción de la subrasante o del conjunto subrasante-subbase (K): Se establece el mismo método de la AASHTO, sin embargo si la capacidad portante es insuficiente se coloca una capa granular y se denomina como la subbase con el fin de elevar el valor de k, para eso se establece la siguiente tabla.

TABLA 15. Valores para K

Valores K de la Subrasante MPa/m	Valores K de Diseño Subbase no Tratadas, MPa/m			
	10 cm	15 cm	23 cm	30 cm
14	18	20	23	30
27	36	38	44	52
55	60	63	74	88
82	88	90	101	118
Valores K de la Subrasante MPa/m	Valores K de Diseño Subbase Tratadas con Cemento MPa/m			
	10 cm	15 cm	23 cm	30 cm
14	47	63	85	107
27	77	110	142	175
55	129	175	227	--

Nota: Adecuación propia con base en datos de PCA (1984).

3. Tránsito: Se estima por medio de las cargas por eje proyectadas al periodo de diseño y se debe incluir el factor de seguridad de acuerdo con la tabla y tasa de crecimiento en la tabla, también se debe conocer el tránsito promedio diario anual, recordando que se debe tener en cuenta el tránsito pesado (González y Vanegas, 2016). Y se determina mediante la ecuación 14.

$$Re = TPDA * (\%Tipo\ de\ eje * FSC) * fS * fc * n * FCA * 365 \quad (14)$$

Donde:

- TPDA: Es el tránsito promedio diario anual.
- Factor de crecimiento del tráfico (FCT) demostrado en la ecuación 15 y tabla 16:

$$FCT = \frac{(1+g)^n - 1}{g} \quad (15)$$

Donde:

- g: Tasa de crecimiento demostrado en la tabla 15.

TABLA 16. Tasa de crecimiento y factor de proyección

TASA DE CRECIMIENTO ANUAL DE TRÁNSITO %	FACTORES DE PROYECCIÓN
	20 años
1	1.1
1.5	1.2
2	1.2
2.5	1.3
3	1.3
3.5	1.4
4	1.5
4.5	1.6
5	1.6
5.5	1.7
6	1.8

Nota: Adecuación propia con base en datos de PCA (1984).

- n: Años de vida útil.

- Factor sentido (fS)
 - Un sentido de circulación es 1
 - Doble sentido de circulación es 2
- Fc: Factor carril demostrado en la ecuación:

$$F_c = \frac{\sum (\text{Tipo de vía} \% * \text{Factor de equivalencia})}{100} \quad (16)$$

- fs: Factor de seguridad demostrado en la tabla 17.

TABLA 17. Factor de seguridad

INTENSIDAD DE TRÁNSITO	FSC
Vías residenciales y otras con bajo volumen de tránsito	1
Vías con moderado volumen de tránsito de vehículos pesados	1.1
Vías con un flujo importante de tránsito pesado	1.2

Nota: Adecuación propia con base en datos de PCA (1984).

3.8.3. Guía de diseño de pavimentos con bajos volúmenes de tránsito y vías locales para la ciudad de Bogotá (IDU)

Este método corresponde a un documento que es el resultado de un trabajo de cooperación técnica entre el Instituto de Desarrollo Urbano, el Banco de Desarrollo para América Latina y la Universidad Nacional de Colombia, con el fin de aplicar en zonas urbanas, con tránsitos permanentes, optimizar recursos técnicos y económicos (IDU, 2013), las variables de diseño están dadas por:

1. El tránsito y el periodo de diseño: Se determinan por medio de la categorización del tránsito como se observa en la tabla 18 para un periodo de servicio de 20 años (Jaimes, 2020).

TABLA 18. Categoría de tránsito de diseño.

DENOMINACIÓN	NÚMERO DE VEHÍCULOS AL DÍA	NÚMERO EJES EQUIVALENTES DE 8.5(NEE)

T1-1	VDPo<50	NEE<2.345.000
T2-1	50<VDPo<100	2.345.000<NEE<4.690.000
T2-2	100<VDPo<150	4.690.000<NEE<7.000.000

Nota: Adecuación propia con base en datos de IDU (2013).

2. Subrasante: Se clasifica igual que en la AASHTO, por medio del CBR, pero se relaciona con el módulo resiliente como se observa en la tabla 19 de subrasantes para Bogotá.

TABLA 19. Subrasantes para Bogotá

TIPO DE SUBRASANTE	CBR %	MÓDULO RESILIENTE (MPa)
SR 1	< 1.5	< 11.25
SR 2	1.5 a 2.5	11 - 19
SR 3	2.5 a 3.5	19 - 26
SR 4	3.5 a 4	26 - 40
SR 5	> 4	> 40

Nota: Adecuación propia con base en datos de IDU (2013).

Capacidad portante equivalente del suelo, se establece de acuerdo a la tabla 20.

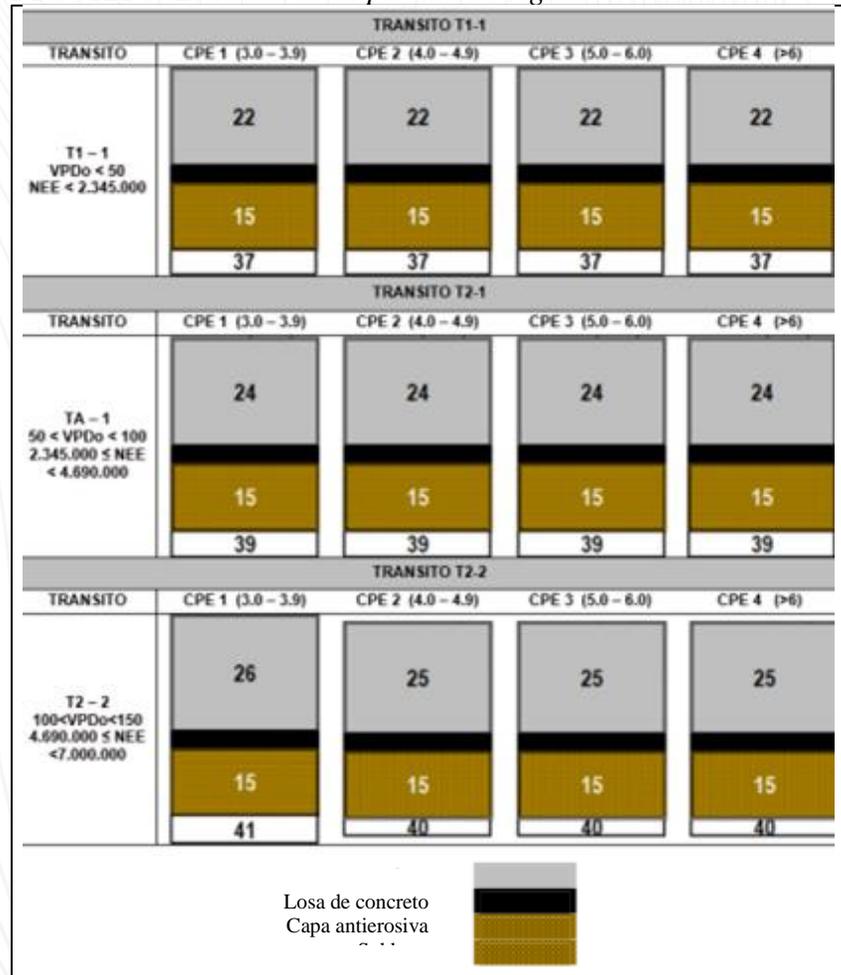
TABLA 20. Capacidad portante equivalente para pavimentos

ENSAYO	CPE			
	1	2	3	4
CBR %	3 - 3.9	4 - 4.9	5 - 5.9	>6
E (MPa)	22.5 - 38.4	40 - 49	50 - 59	>60
k (MPa/m)	28 - 34.3	35 - 39.5	40 - 42.7	>43

Nota: Adecuación propia con base en datos de IDU (2013).

3. Concreto: Mantiene el mismo desarrollo que en los otros métodos y establece unos rangos para módulo de rotura de 4 a 4.5 MPa, dado a los 28 días (Jaimes, 2020).
4. Clima y drenaje: Describe las variables, y propone controlar los niveles freáticos y el drenaje superficial y subsuperficial (IDU, 2013).
5. Diseño propuesto de espesores para las capas se observa en la figura 8, de acuerdo a las características ya definidas anteriormente por el IDU.

FIGURA 8. Estructuras de pavimento rígido

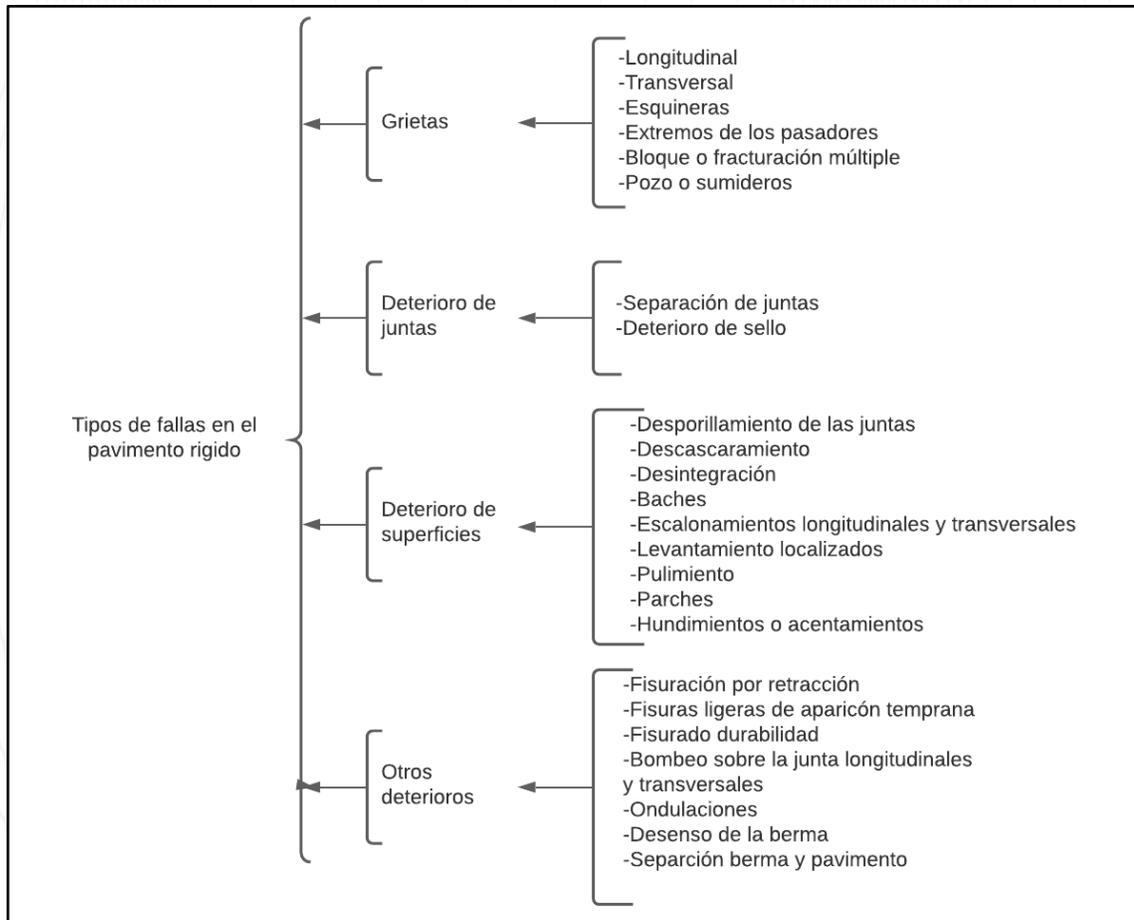


Nota: Adecuación propia con base en datos de IDU (2013).

3.9. FALLAS DE LOS PAVIMENTOS RÍGIDOS

Los pavimentos rígidos son diseñados con concreto, ya que, son materiales más resistentes y maleables en la industria de la construcción, no obstante pueden presentar afectaciones producidas por diversas fallas como las representadas en la figura 9, estas pueden ser producidas por erosiones, movimiento de masas, adicional malas prácticas de diseño, construcción y los materiales utilizados no son los adecuados, entre otros.

FIGURA 9. Clasificación de fallas en el pavimento.



Nota. Fuente elaboración propia con base de datos de Invias (2006).

3.9.1. Las grietas

En este tipo de fallas se incluyen todas las discontinuidades y fracturas que afectan la losa de concreto como se evidencia en la tabla 21 y la severidad de las fallas depende del ancho de las grietas (Invias, 2006), en donde:

Baja: Aperturas menores a 3 mm, se considera como fisura.

Media: Aperturas entre 3 a 10 mm

Alta: Aperturas mayores de 10 mm

TABLA 21. Tipos de grietas

TIPO GRIETAS

FALLAS	DESCRIPCIÓN	CAUSA	PREVENCIÓN	REFERENCIAS
LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL	Tiene una orientación perpendicular o paralela al eje del pavimento.	- Aserrado tardío. -Por fatiga (espesor insuficiente o juntas demasiado separadas). -Erosión o asentamientos diferentes. -Reflexión de fisuras internas o losas adyacentes.	-Diseños adecuados de juntas. -Espesores adecuados para la calzada y control de la subrasante.	(Argos, 2014; Alarcón y Restrepo, 2018; Invias, 2006)
ESQUINERAS	Se genera al interceptarse la junta longitudinal y la junta transversal, formando un ángulo de 45° en el pavimento.	-Pobre transferencia de carga. -Ángulos agudos. -Pérdida de soporte por erosión.	-Transferencia de carga adecuada. -Diseño adecuado para juntas en geometrías irregulares sub-base resistente a la erosión.	(Argos, 2014; Invias, 2006)
EXTREMOS PASADORES	Cerca a los extremos de los pasadores o dovelas.	-Mala ubicación de los pasadores. -Movimiento de los pasadores en el proceso constructivo.	-Diseño adecuado de los pasadores. - Mantener fijo los elementos en momento de construir.	(Argos, 2014; Alarcón y Restrepo, 2018; Invias, 2006)
BLOQUE O FRACTURACIÓN MÚLTIPLE	Rompimiento en gran parte de la losa formando bloques pequeños.	-Fatiga (cargas repetidas con gran peso). - Diseño errado. -Soportes deficientes.	-Elaborar un buen diseño. - Materiales de base no erodable. -Instalar drenajes. -Compactar la subrasante.	(Argos, 2014; Invias, 2006)
POZO Ó SUMIDEROS	Está relacionada con la presencia de pozos o sumideros.	-Pozos. - Sumideros.	-Diseños adecuados de la subrasante, sub-base y losa de concreto.	(Alarcón y Restrepo, 2018; Invias, 2006)

3.9.2. Deterioro de juntas

Ocurren al depositarse material no compresible en las juntas, impidiendo el movimiento de la losa, también se presenta por pérdida u oxidación del sello, permitiendo desportillamientos de la losa, levantamientos o fracturas en las aperturas o sellos (Argos, 2014), siendo común en los pavimentos rígidos y se clasifican por deterioro bajo, medio y alto (en baja con aperturas menores a 3 mm, media con aperturas entre 3 a 25 mm y alta con aperturas mayores a 25 mm) (Invias, 2006).

3.9.3. Deterioro de la superficie

El deterioro de la superficie se puede dar por diversas causas como se identifica en la tabla 22, donde se presentan las fallas que se pueden dar en la superficie del pavimento de concreto.

TABLA 22. Tipos de deterioro superficial

TIPO DETERIORO SUPERFICIE

FALLAS	DESCRIPCIÓN	CAUSA	PREVENCIÓN	REFERENCIAS
DESPORTILLAMIENTO DE LAS JUNTAS	Desfragmentación en los bordes de las juntas o fisuras.	-Concreto debilitado por falta de compactación. -Entrada de materiales incompresibles en las juntas.	-Uso de desmoldantes para evitar impactos sobre la formaleta, la cual afecta los bordes de la junta. -Especificar material de sellado que prevengan la filtración de agua y material incompresible.	(Argos, 2014)
DESCASCARAMIENTO	Desprendimiento del concreto en la superficie con profundidades de 5 a 15 mm.	-Debilitación del concreto por retracción. -Armaduras de acero cerca a la superficie.	-Espesores de acuerdo a las indicaciones. -Buen proceso constructivo.	(Argos, 2014; Invias, 2006)
DESINTEGRACIÓN	Pérdidas del material fino de la superficie, provocando rugosidad y algunas cavidades en la capa de rodadura.	-Efecto abrasivo de tránsito en concretos pobres. -Deficiencias en su construcción.	-Calidad de concreto. -Buen proceso constructivo.	(Argos, 2014)
BACHES	Remoción de áreas, creando cavidades de bordes irregulares en la losa de concreto.	-Capas inferiores inestables. -Espesor y defectos constructivos. -Retención de agua.	-Mantenimiento preventivo. -Buena compactación. -Buenos diseños y procesos constructivos. -Manejo de aguas y drenajes.	(Argos, 2014; Invias, 2006)
ESCALONAMIENTO	Desnivel de la losa en su junta con la losa vecina.	-Por el tránsito. -Cambio de volúmenes de las capas inferiores a la losa de concreto.	-Mantenimiento de juntas. -Adecuada colocación del acero. -Buena compactación de los materiales de soporte. -Losas no erodables.	(Invias, 2006)
HUNDIMIENTOS	Descenso de la superficie del pavimento, donde se encuentre gran grado de fisuración.	-Zonas contiguas a estructuras de drenaje. -Deficiencia de compactación. -Deficiencia del proceso constructivo.	-Buena compactación de los materiales de soporte. -Nivel freático cercano de la estructura. -Empleo de drenaje.	(Argos, 2014)
LEVANTAMIENTO	Se genera movimiento en la superficie del pavimento donde presenta fisuras o juntas y una desfragmentación.	-Expansión generada por la reacción álcali- sílice. -Inadecuado diseño de juntas. -Entrada de materiales incompresibles en las juntas.	-Diseño adecuado de juntas. -Especificar el material de sellado que prevenga la filtración de agua y material incompresible.	(Argos, 2014)

3.9.4. Otros deterioros

Erosión por bombeo consiste en el movimiento de agua ubicada debajo de la losa, generando una presión por acción de las cargas, causado por deflexiones excesivas en bordes y esquinas o la disponibilidad de agua en las capas inferiores del pavimento (Calo, 2012)

Reacción álcali genera fisuras con hendiduras ubicadas en paralelo a los bordes libres, causado por agregados sin tomar medidas preventivas, se requiere de un año para evaluar los agregados (Argos, 2014).

Losa subdividida son fracturas que forman mallas amplias dividiendo la losa en cuatro o más planos, debido a la fatiga del concreto y la variación de espesores de la losa, se requiere emplear materiales de bases no erodables, instalar drenajes y compactar la subrasante (Argos, 2014).

3.10 AVANCES TECNOLÓGICOS

Ante las distintas fallas presentadas en los pavimentos, en las últimas décadas se han buscado tecnologías que permitan tener una mejor durabilidad y eficiencia, que además sean amigables con el medioambiente. De las investigaciones realizadas se plantean tecnologías que son innovadoras como lo es concreto autorreparable, el concreto Topmix, concreto fosforescente, impresora de calzada y los geosintéticos descritos a continuación:

- Topmix es un tipo de concreto compuesto de asfalto reciclado y fibra de metal recuperado de desechos industriales, el cual permite absorber grandes cantidades de agua, de acuerdo con Asocem (2016) de hasta 880 galones por minuto, permitiendo que el agua se acumule debajo de la capa de concreto para luego ser evaporada.
- Concretos autorreparables: según diversos autores estos concretos tienen la capacidad de sellar o rellenar microgrietas, sin la necesidad de reparación manual (Roig-Flores et al., 2021).
- La impresora de calzada se le ajusta un comando y una dimensión, para luego fijar la pavimentada de adoquines, siendo capaz de colocar 500 metros al día, fue diseñada por RP Systems y fue llamada “RP S6 o Road Printer” conocido como “Impresora de Carreteras”. (Arquitectura e Ingeniería, 2018)

- Geosintéticos son mallas de fibras poliméricas termoplásticas, que proporcionan propiedades mecánicas, hidráulicas y durabilidad, utilizadas para pavimentos, ferrovías, obras en minería, lagunas, estanques y taludes que presenten fallas de origen natural como la erosión.

Se debe tener en cuenta la función y uso de estos mismos para determinar el adecuado para las características en el sistema vial analizado, los tipos más comunes de acuerdo con (Day, 2012).

- Geomalla de poliéster tienen refuerzos biaxiales lo cual permite reforzar, son recomendadas para implementar en pavimentos, ya sean para mantenimiento o nuevos.
- Las Geoceldas tienen refuerzos biaxiales y sirven para el mejoramiento del suelo, estas se recomiendan para pavimentos donde el suelo es inestable.
- Geotextiles tejidos y no tejidos consisten en la separación de materiales, reforzar y permiten la filtración, sirve para pavimentos que requieren la separación de la subrasante.

También se han investigado algunos tipos de agregados al medio de mezcla, que resultan ser beneficiosos para los pavimentos. Como lo es el cloruro de sodio descrito a continuación:

- El cloruro de sodio es utilizado para estabilizar las bases, evitando la evaporación del agua, la reducción de la temperatura de congelación y poder así aumentar la resistividad a compresión.

Como se mencionó anteriormente el concreto autorreparable se emplea para el sellado de microgrietas, por medio del uso de microorganismos como las bacterias precipitadoras de carbonato de calcio, para implementar este tipo de concreto se deben conocer parámetros que son clave para el desarrollo de esta tecnología. Se debe tener en cuenta que existen dos tipos de autorreparación la autógena y autónoma, definidas como:

- Autorreparación autógena: Mantiene sus propiedades de manera natural mediante el proceso de hidratación del cemento deshidratado y carbonatación del hidróxido de calcio. Algunos estudios evidencian que de 3 a 5 días sellaba grietas de hasta 0.06 mm (Wang et al., 2019), también de 0.2 mm (Roig y Serna, 2020; Sangadji, 2017; Vijay et al., 2017) o 0.3 mm después de una cicatrización durante un año (Suleiman y Nehdi, 2018), y si se deja por 90 días bajo agua, se tendrá sellado de hasta 0.45 mm (Yıldırım et al., 2018).

→ Autorreparación autónoma: Son producidas por cepas de agentes diseñados para introducirse en el concreto, ya sea por medio de encapsulado o embebidos que se liberan al producirse una fisura o por contacto con el agua o aire en la fisura (Han y Xing, 2017).

Para la autoreparación autónoma se debe realizar el proceso de hidratación donde se mezclan los agentes biológicos y los materiales de diseño del pavimento provocando uno de los diferentes mecanismos para llegar a la precipitación del carbonato de calcio como la hidrólisis (Roig et al., 2021).

Esta precipitación del carbonato de calcio se refiere a cuatro factores claves descritos por Paramo et al. (2015), estos son:

1. El carbono inorgánico debe estar disuelto en la concentración.
2. Se debe mantener el pH entre 8,7 a 9,5.
3. Los iones de calcio deben presentar una concentración menor, ya que forma complejos solubles débiles.
4. El sitio de nucleación es para el desarrollo de cristales.

Además, parámetros ambientales tales como temperaturas entre 20 °C a 30 °C y salinidad (Paramo et al., 2015).

Bacterias precipitadoras de carbonato de calcio: Las altas concentraciones de estas, permiten que se alcalinice el medio aumentando el valor en la ureasa, beneficiando la precipitación del carbonato de calcio, está variable está directamente relacionada con la concentración de urea (con una buena concentración de urea favorece la alcalinización alrededor de la célula, esto aporta la producción de la precipitación del carbonato de calcio) (Giraldo Mora, 2017). Distintas investigaciones registran las siguientes bacterias por ser precipitadoras de carbonato de calcio y eficientes en el sellado de microgrietas:

- *Bacillus cereus*
- *Bacillus pasteurii*
- *Bacillus subtilis*
- *Bacillus sphaericus*

→ *Myxococcus xanthus*

4. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

La línea de tiempo data desde la antigüedad donde el fenómeno de la autocuración fue conocido en el concreto, ya que posee algunas propiedades naturales, esto recibió atención académica por primera vez por la academia Francesa de ciencias en 1836 (De Belie et al., 2018; Van y De Belie, 2013). Ocurrido por la hidratación continua en los minerales de clinker o la carbonatación del hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), las micro grietas pueden sanar después de algún tiempo.

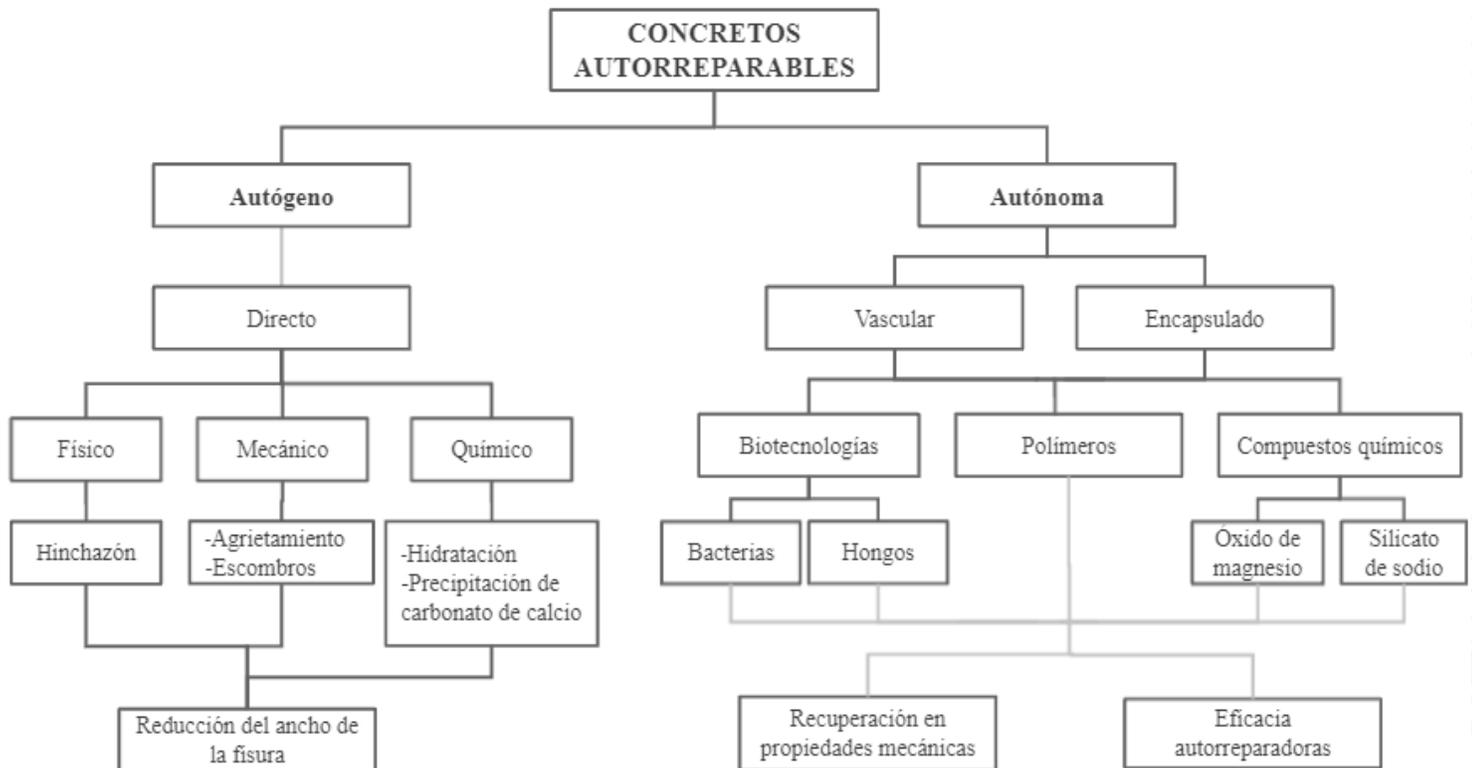
Las propiedades de autorreparación se iniciaron por primera vez en el interior de materiales poliméricos en 1969, aparecieron publicaciones sobre la autocuración en sistemas termoplásticos y reticulados a partir de 1979 (Malinskii et al., 1970). Se comenzó a trabajar en concretos autorreparables en la década de los 90 (Dry, 1994). Aunque, fue solo en 2001 cuando se publicó el artículo en Nature sobre la autocuración en materiales basados en polímeros (White et al., 2001), lo cual comenzó a atraer mucha atención.

Siguiendo la línea de tiempo, se resalta la propuesta de Architect Magazine la universidad tecnológica de Delft donde proponen la línea de investigación de materiales autorreparables, proponiendo un asfalto autorreparable por medio de circuitos cerrados de electricidad, los cuales generan calor suficiente para derretir el betún y de esta forma se sellan las grietas (Magazine y Techxplore, 2018). Para concreto autorreparable el profesor Henk Jonkers siendo pionero en la investigación del material, propone el nombre de “bioconcreto”, donde utiliza bacterias inyectadas que se activan si el agua se filtra a través de las grietas, así permite reparar y sellar las grietas convirtiéndose en piedra caliza (Giraldo, 2017).

Lo anterior hace parte del método de autorreparación autónoma estudiado por varios autores como los siguientes Muynck et al. (2010) y Jonkers (2011). Mediante la cicatrización bacteriana que está ligada directamente a las propiedades químicas, físicas y mecánicas presentes en la composición del concreto, y en donde el dióxido de carbono se introduce en la fisura o microgrieta, permitiendo de esta forma, que el mismo reaccione con la hidratación del hidróxido de calcio, ocasionando la precipitación del carbonato de calcio (CaCO_3) y/o cristales de calcita, que provocan el relleno y sellado de la fisura o microgrieta (Giraldo, 2017).

Para el desarrollo de concretos autorreparables, se han revisado diversos estudios que demuestran diferentes técnicas de desarrollo y evaluación de las características físicas, mecánicas, vida útil, entre otras, que poseen un gran potencial como se demuestra en la figura 10; Los agentes autorreparadores se describen en los artículos investigados que se clasifican en la tabla 23.

FIGURA 10. Clasificación de procesos para generar concretos autorreparables.



Nota. Diagrama de flujo de la recopilación de procesos autorreparadores en concretos en la literatura. Fuente: Elaboración propia con base de datos de Sidiq et al. (2019).

TABLA 23. Documentos por año encontrados en Scopus.

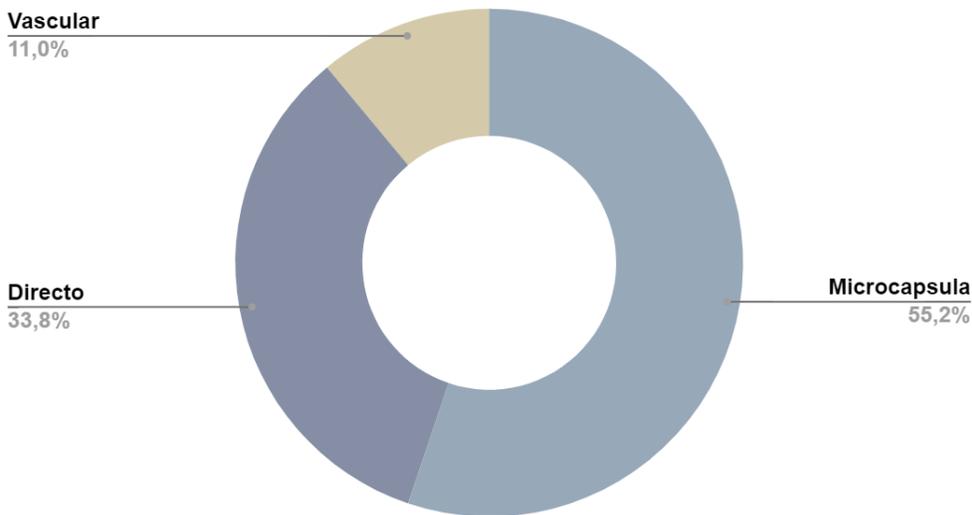
CLASIFICACIÓN	SUB-CLASIFICACIÓN	CITAS	ACCESIBLE
Autorreparación autógena		(Suleiman y Nehdi, 2018)	
	Hidratación	(Roig-Flores y Serna, 2020)	Accesible Accesible
	Carbonatación	(Yıldırım et al., 2018).	Accesible
	Diversas exposiciones naturales	(Sangadji, 2017) (Cuenca et al., 2021)	Accesible Accesible

Autorreparación autónoma	Agentes químicos inorgánicos	(Sisomphon et al., 2012) (Sisomphon et al., 2013) (Roig et al., 2016) (Roig et al., 2015)	Accesible Accesible Accesible Accesible
	Biotecnologías	(Saleem et al., 2021) (J. Zhang et al., 2019) (Nain et al., 2019) (Shaheen et al., 2019) (J. Zhang et al., 2017) (Huynh et al., 2017) (Vijay et al., 2017)	Accesible Accesible Accesible Accesible Accesible Accesible Accesible
	Polímeros	(Taheri y Clark, 2021) (Sidiq et al., 2020) (Han & Xing, 2017) (De Nardi et al., 2021)	Accesible Accesible Accesible Accesible
Evaluación	Sellado de grietas	(Lee et al., 2021) (Litina et al., 2021) (Cuenca et al., 2018) (Belie, 2016)	Accesible Accesible Accesible Accesible
	Otros aspectos	(Xu et al., 2021) (Y. Wang et al., 2021) (Roig et al., 2021) (Kamal & Bas, 2021) (Z. Zhang et al., 2017)	Accesible Accesible Accesible Accesible No Accesible

Cabe destacar que aparte de la selección de la tecnología de autorreparación más eficiente, es importante seleccionar un mecanismo seguro y eficaz para administrar los agentes a la mezcla del concreto o cemento, por ende se presenta en la figura 11 los métodos de implementación más comunes.

FIGURA 11. *Métodos de implementación de los agentes a la mezcla de concreto o cemento*

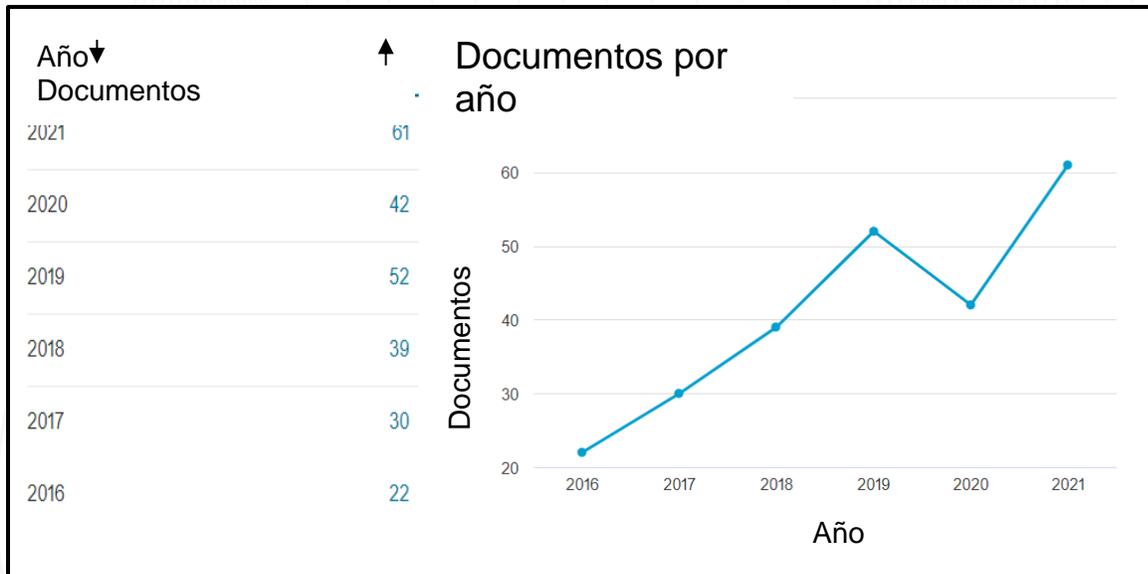
MÉTODO DE TRANSPORTE DE MATERIALES AUTORREPARABLES A LA MATRIZ



Nota. Porcentajes de implementación de los métodos. Fuente: Adecuación propia con base de datos de Sidiq et al. (2020).

Por otro parte, para desarrollar este documento se realizó una investigación previa, usando palabras claves como se indicó a continuación en la ecuación de búsqueda establecida: “ALL ("Self-healing" AND concrete) PUBYEAR > 2015 AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE, "re"))”. De las fuentes de revistas y sitios web como: Scopus, ResearchGate, Science direct y destacando a la National Natural Science Foundation of China quien ha aportado más en este campo de investigación, según los artículos encontrados. En la figura 12 se puede identificar 246 artículos publicados desde el 2016 al año actual, sobre el tema de concretos autorreparables, sin embargo enfocados a los pavimentos rígidos autorreparables solo se encontraron 5 artículos de conveniencia.

FIGURA 12. *Análisis de los documentos*

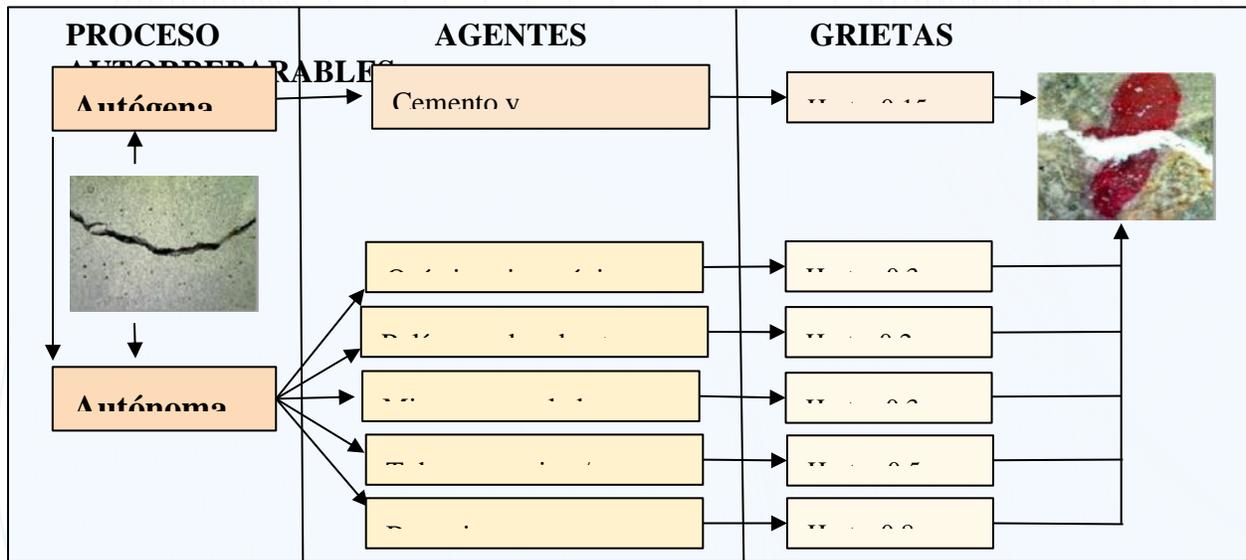


Nota. Documentos por año. Fuente adecuación propia con base de datos de Scopus.

Siguiendo esta línea de investigación se establece que la degradación y envejecimiento del concreto están relacionados con su estructura porosa y su inevitable propensión a agrietarse, debido a cargas mecánicas y exposición ambiental (Suleiman y Nehdi, 2018). Esto ha impulsado al desarrollo de tecnologías para el concreto, que pueden clasificarse en tratamientos pasivos que se aplican manualmente después de la inspección y autorreparación de las grietas de la superficie, y los métodos activos que se incorporan en la etapa de construcción pueden rellenar grietas tanto en interiores como exteriores (De Belie et al., 2018).

La autorreparación del concreto se puede dividir de acuerdo a algunos mecanismos basados en el tamaño de la microgrieta sellada, como se observa en la figura 13.

FIGURA 13. Clasificación de autorreparación y su tamaño de grieta sellada



Nota. Clasificación y resultado de la autorreparación. Fuente: Adecuación propia con base de datos de (Roig et al., 2021; De Belie et al., 2018).

Con base en la figura anterior se distinguen dos formas para realizar el sellado de la microgrietas, se describen a continuación:

4.1. AUTORREPARACIÓN AUTÓGENA

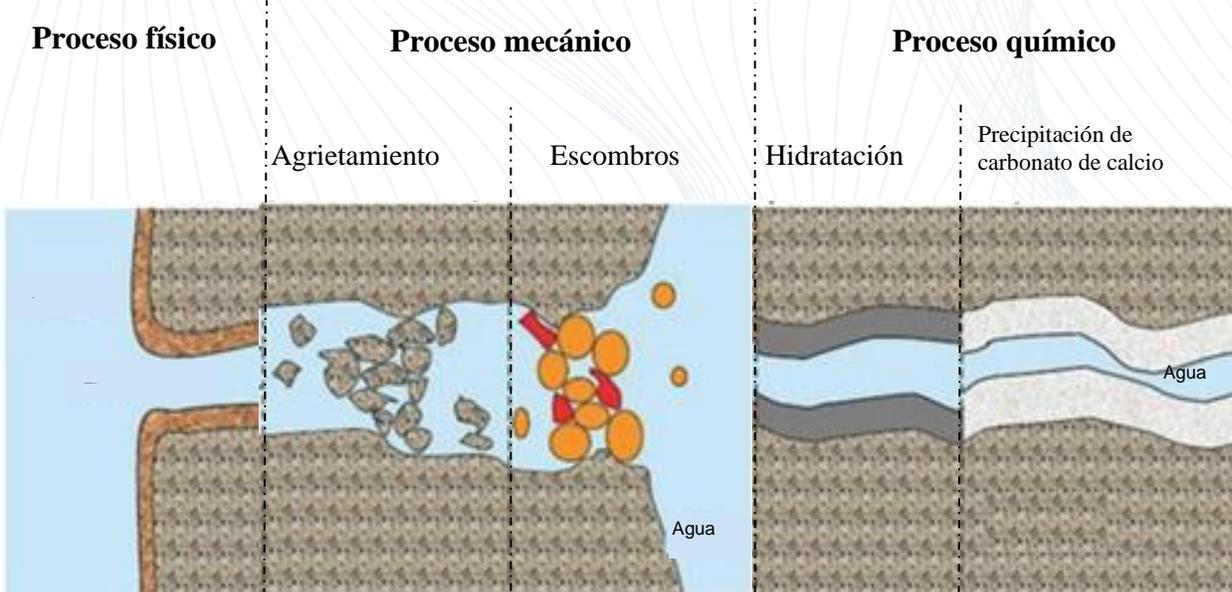
Se genera por la matriz de composición del cemento y se puede estimular por adiciones suplementarias (Cuenca et al., 2018; De Belie et al., 2018; Roig et al., 2021), siendo un proceso natural del concreto sin importar que este sea diseñado para la autorreparación, se realiza por medio de dos mecanismos, la hidratación y la carbonatación (De Belie et al., 2018; Suleiman y Nehdi, 2018; Huang et al., 2014; Van y De Belie, 2013; Wiktor y Jonkers, 2011; Hearn, 1998).

La autorreparación autógena depende de la edad del concreto, ya que a temprana edad se genera por medio de la hidratación, mientras que a una edad avanzada se genera por medio de la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3) (De Belie et al., 2018), se identifica que este proceso se obtiene cuando la estructura se encuentra en constante contacto con el agua y en cambio en ambientes húmedos la autorreparación no es efectiva (De Belie et al., 2018; Roig et al., 2021; Roig y Serna, 2020).

Los resultados de este método varía de acuerdo a los factores que intervienen, los cuales son la edad y propiedades del concreto, la presencia de agua y la forma de fisura (De Belie et al., 2018), resaltando que la autorreparación autógena se da en grietas de menor tamaño, obteniendo

un máximo de hasta 0.15 mm de ancho de grieta sellada (Roig et al., 2021). Los procesos que pueden ocurrir en la autorreparación autógena se observa en la figura 14, donde se evidencia que debe haber presencia de agua constante para efectuarse (Van y De Belie, 2013).

FIGURA 14. *Procesos que ocurren en la autorreparación autógena*



Nota. Representación de los procesos de autorreparación autógena de materiales cementosos.
Fuente: Adecuación propia con base de datos de (De Belie et al., 2018; Roig y Serna, 2020).

Para tener un claro ejemplo del proceso de la autoreparación autógena, se indican dos casos, el primero utiliza polvo de piedra caliza, fibras de acero y un superplastificante, mientras que en el caso dos se utiliza aditivo cristalino, escoria, nano-fibras de aluminio y fibras acero, como se presentan en la tabla 23, con los materiales principales para el diseño del concreto, cada uno contiene sus características y cantidades.

TABLA 23. Casos de autorreparación autógena

AUTORREPARACIÓN AUTÓGENA		
CASO 1	MATERIALES DEL CONCRETO	CANTIDAD (Kg/m ³)
Especimen en cilindro de 150*300 mm	Cemento CEM I 42.5R	275
	Agregado grueso calcáreo triturado (4-12 mm)	908
	Arena calcárea	988
	Polvo piedra caliza	50
	Superplastificante Sika ViscoCrete-5980	5

	Fibras de acero (35 mm longitud y 0.55 mm diámetro)	40
	Agua	165
CASO 2	MATERIALES DEL CONCRETO	CANTIDAD(Kg/m3)
Especimen de 100*450*25 mm	Cemento CEM I 52.5 R	600
	Escoria	500
	Arena (0-2 mm)	982
	Superplastificante Sika ViscoCrete-5980	33
	Aditivo cristalino	4,8
	Fibras de acero (20 mm longitud y 0.22 mm diámetro)	120
	Nano-fibras de alúmina (100 - 900 nm longitud y 4-11 nm diámetro)	1,5
	Agua	200

Nota: Elaboración propia con base en datos de (Cuenca et al., 2021; Roig y Serna, 2020).

Caso 1 se implementan unas condiciones similares a la construcción real, decidiendo obtener una mezcla de condición S3 utilizando el superplastificante y las fibras de acero para controlar el ancho de las fisuras (Roig et al., 2016). Se fundieron tres especímenes en cilindros de 150*300 mm, la curación fue en un molde durante 24 horas, luego se mantuvo en una cámara húmeda durante 28 días para realizar ensayos de resistencia a la compresión, dando un promedio de 38.3 MPa y el otro ensayo de asentamiento que fue de 145 mm.

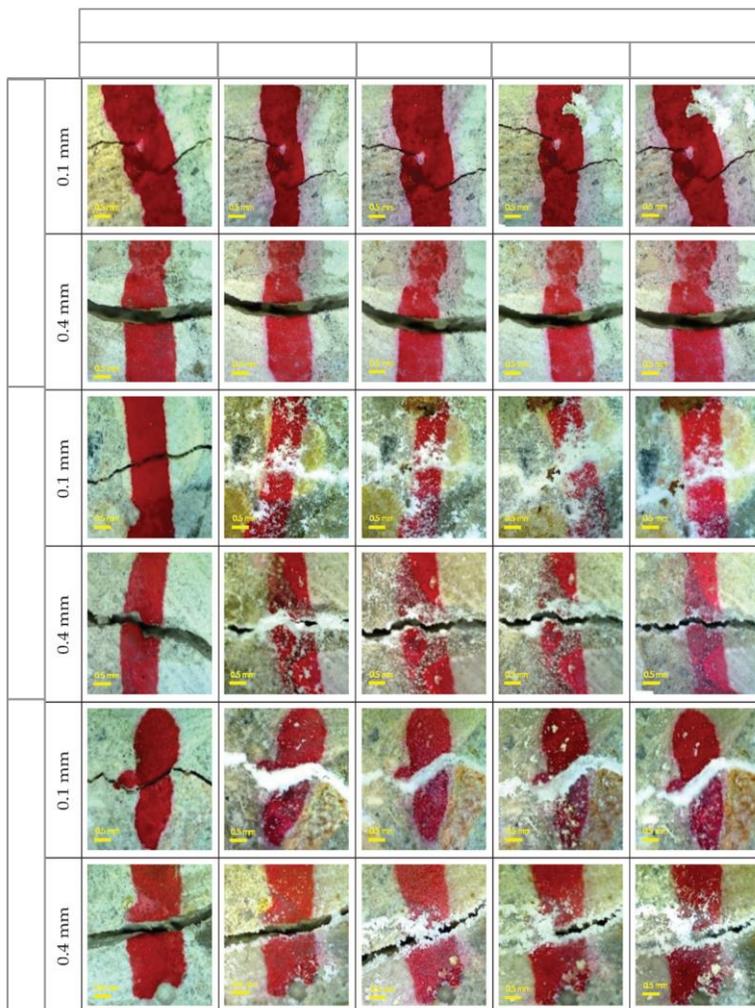
Las probetas se cortaron a la mitad quedando de 150*150 mm y se fundieron en total 18 especímenes, luego se pulen para tener mejor visión de las fisuras. Se pre-fisura a la edad de dos días definiendo fisuras de 0.1 y 0.4 mm por espécimen, dando un total de 36 fisuras analizadas, se deja de curar a la edad de 3 días durante 42 días, analizando el ancho de grietas de cicatrización de los días 0, 7, 14, 28 y 42. Posteriormente se consideró tres tipos de exposición ambiental, las cuales son (Roig y Serna, 2020; Suleiman y Nehdi, 2018):

- Cámara humedad (HC): De temperatura 20 ± 2 ° C y $> 95\%$.
- Ciclo húmedos y secos (HS): De temperaturas 15° C para inmersión en el agua y 17 ± 1 ° C y $40 \pm 3.5\%$ a exposición al aire, cada uno con intervalos de 3.5 días.

- Inmersión en agua (IA): De temperatura $15 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Se obtuvo una curación parcial de la superficie de la fisura, en los especímenes que estaban expuestos a ciclos húmedos y secos, y de la inmersión en agua, sin embargo se logró sellar por completo las grietas de 0.1 mm, y las grietas de 0.4 mm solo en algunas partes cuando estuvo expuesta a inmersión en agua, obteniendo una eficacia máxima del 77%. En la gráfica 15 se compara cada exposición y su tiempo de autorreparación. También se realizó un corte transversal en donde se evidenció que las fisuras profundas no se autorrepararon, dejando una serie de inquietudes.

FIGURA 15. *Análisis autorreparación autógena caso 1*



Nota. Comparación avance evolutivo de la autorreparación autógena. Fuente: Adecuación propia con base de datos de Roig y Serna (2020).

Caso 2 se realizó en ambientes químicamente agresivos, ya que se espera emplear en cuencas de aguas de las torres de refrigeración con temperaturas de 30° C y en centrales geotérmicas como demostración piloto (Cuenca et al., 2021). Con el fin de alcanzar un nivel de endurecimiento en términos de resistencia y de deformación, se realizaron especímenes con y sin aditivos cristalinos y nano-fibras para mantener una referencia. Se reemplaza una parte del cemento por escoria adecuada para la estabilidad de aguas con sulfato, el aditivo cristalino estimula la autorregulación (Cuenca et al., 2021; Huang et al., 2014).

Primero se debe mezclar en seco el cemento, escoria, arena y el aditivo cristalino, luego el agua y el superplastificante, se mezclan por 15 minutos, para luego agregar las fibras y regresar a mezclar por otros 3 minutos.

Se funden cubos de 100 mm laterales para realizar ensayos de compresión, mientras que para los de flexión se toman cuatro puntos en la viga de 100 mm de ancho, 25 mm de espesor y casi 500 mm de largo, en total se realizó 14 ensayos, cada espécimen se curó por más de 2 meses (Cuenca et al., 2021).

Para determinar la autorreparación se fisuraron muestra de 100 mm de diámetro y 40 mm de espesor, las fisuras fueron de 0.1 mm, la apertura residual vario entre 0.05 a 0.15 mm. Se obtuvo que los especímenes con nano fibras de alúmina permitían mantener aperturas estrechas y mejoraba el comportamiento de sellado en comparación con las otras muestras (Muzenski et al., 2019, 2020), presentando un gran contenido de carbonato y tuvo una mejor curación en el rendimiento mecánico (Cuenca et al., 2021).

Sin embargo, se encontró que la ceniza volante mantiene fisuras más pequeñas a comparación de la escoria, ya que esta proporciona matrices cementosas más fuertes (Huang et al., 2014; Suleiman y Nehdi, 2018; Yıldırım et al., 2018). La mayoría de la literatura concuerda que un 77% de fisuras de 0.1 mm se autorreparan completamente, mientras que un 52% de fisuras de 0.2 mm se autorreparan por completo (Fagerlund y Hassanzadeh, 2010; Roig et al., 2016; Roig y Serna, 2020; Yıldırım et al., 2018).

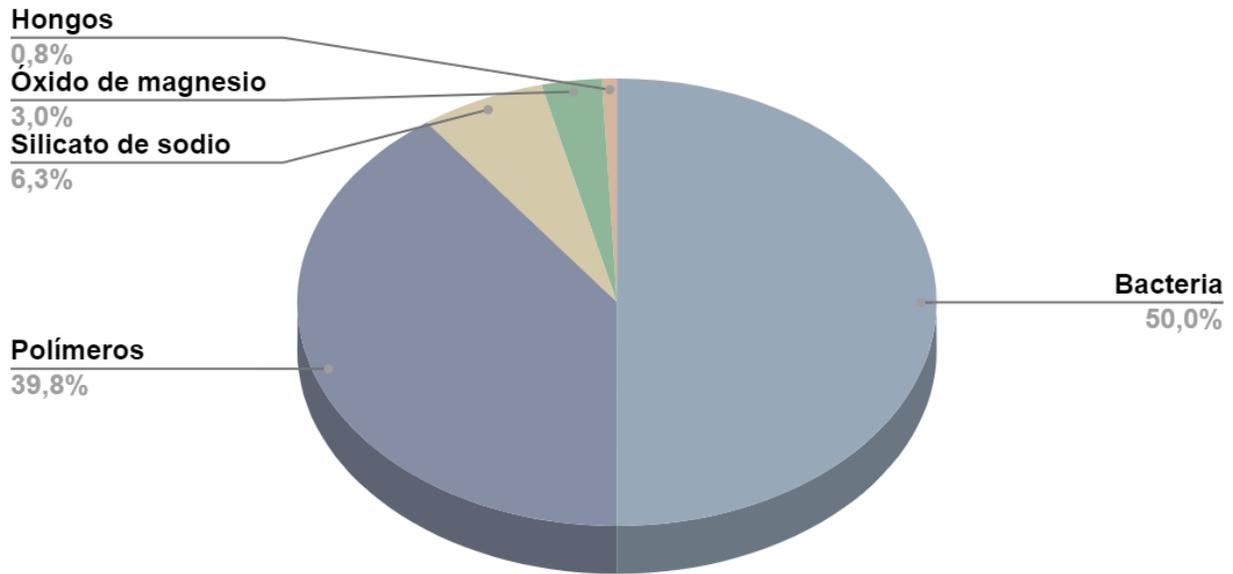
4.2. AUTORREPARACIÓN AUTÓNOMA.

Se desarrolla por la implementación de agentes diseñados para mezclarse en la matriz cementosa o introducidas en cápsulas, las cuales protegen a los agentes hasta que son liberados (Han y Xing, 2017; Roig et al., 2021). La autorreparación de grietas en base cementosa ha buscado

diversos procesos curativos como los polímeros, compuestos químicos o biotecnología, como se muestra en la figura 16 (Sidiq et al., 2020).

FIGURA 16. *Agentes que intervienen en la autorreparación autónoma*

AGENTES AUTORREPARADORES AUTÓNOMA



Nota. Variedad de agentes implementados en la autorreparación autónoma. Fuente: Adecuación propia con base de datos de Sidiq et al., (2020).

Los agentes autorreparadores provenientes de las biotecnologías son considerados como los más favorables en los productos a base de cemento (Sidiq et al., 2019), ya que las cargas electronegativas de las bacterias atrae los cationes de calcio, obteniendo precipitación de carbonato de calcio (Boquet et al., 1973; Hammes et al., 2003), sin embargo han presentado limitaciones debido a la falta de nutrientes que acorta la vida de las bacterias (Sidiq et al., 2019). Por lo tanto, investigadores implementaron diversas técnicas para introducir bacterias a la mezcla del concreto obteniendo mejor eficiencia y mejor autorreparación, como se indica en la tabla 24, por medio del ensayo de compresión, sin embargo hay otras bacterias que se han implementado, de estas solo se ha evaluado el espesor de la fisura que es capaz de autorreparar.

TABLA 24. Mejora del concreto por diferentes bacterias

NOMBRE BACTERIA	CONCENTRACIÓN	EFICACIA (%) (Recuperación propiedades mecánicas)	REFERENCIA
Lysinibacillus fusiformi	-	4,5	(Park et al., 2010)
Arthrobacter crystallopoietes	-	8,9	
Bacillus sphaericus	-	11,2	(Gavimath et al., 2012)
	-	14,3	
Bacillus pasteurii	$5,2 \times 10^7$ células / ml	12	(Ramachandran et al., 2001)
	-	33	(Abo-El-Enein et al., 2013)
	10^3 células / ml	22	(Khaliq y Ehsan, 2016)
	10^5 células / ml	29	(Pei et al., 2013)
Bacillus subtilis	$2,8 \times 10^8$ células / ml	12	(Vempada et al., 2011)
	0,33 mg / ml	14,8	(Chahal et al., 2012)
	10^5 células / ml	19,2	(Andalib et al., 2016)
Bacillus megaterium	30×10^5 células / ml	24	(Ghosh et al., 2005)
Shewanella	10^5 células / ml	25,3	(Maheswaran et al., 2014)
Bacillus sp. CT-5	Densidad óptica (OD 600 de 1)	36,15	(Achal et al., 2013)
Bacillus cereus	10^6 células / ml	38	(Maheswaran et al., 2014)

Nota: Adecuación propia con base en datos de Sidiq et al. (2019).

El segundo material más usado son los polímeros, los cuales dependen de las fuerzas entrelazadas entre la superficie de la pared de la grieta y el material polimérico (Joseph et al., 2010), sin embargo este proceso es insuficiente en recuperar las propiedades mecánicas, ya que

tienen poca adherencia entre los materiales poliméricos y la pared de la grieta (Gilabert et al., 2017). Los polímeros adoptados para la autoreparación del concreto se indican en la tabla 25, en donde se observa la eficiencia por medio de la recuperación de las propiedades mecánicas, para esto implementan ensayos a la compresión y flexión en 3 puntos.

TABLA 25. Mejora del concreto por diferentes polímeros

POLÍMERO	MÉTODO	EFICIENCIA	REFERENCIA
Resina epoxica	Encapsulamiento	Mejora la fuerza de compresión 1,9 veces más Mejora la fuerza de flexión 1,3 veces más	(Li et al., 2013)
SAP	-	Mejora la fuerza en un 8%	(Gruyaert et al., 2016)
Monómero de metacrilato de metilo	Encapsulamiento	Mejora la fuerza en un 30,4%	(Yang et al., 2010)
Poliuretano	Encapsulamiento	Mejora la rigidez en un 35%	(Feiteira et al., 2016)
Epoxi de PMMA	Inyección	Mejora la fuerza en un 50% a 54%	(Kan et al., 2008)
Poliuretano	Encapsulamiento	Mejora la resistencia en 54% Mejora la rigidez en un 52%	(Tittelboom et al., 2011)

Nota: Adecuación propia con base en datos de Sidiq et al. (2019).

El silicato de sodio es considerado como un agente autorreparador, ya que genera una relación química entre las partículas de hidróxido de calcio no hidratado y el silicato de sodio, formando silicato de calcio hidrato en forma de gel, el cual se forma durante el proceso de endurecimiento de la base del cemento (Chen et al., 2004; Giannaros et al., 2016; Jennings, 2000), además mejora la eficacia de la autorreparación, recuperando parcial y totalmente las propiedades mecánicas y permeabilidad de la estructura (Sidiq et al., 2020). Algunos métodos para incorporar el silicato de sodio se indican en la tabla 26 con su porcentaje de eficiencia en la recuperación de sus propiedades mecánicas.

TABLA 26. Mejora del concreto por método de incorporación de silicatos de sodio

MÉTODO	EFICIENCIA (Recuperación)	REFERENCIAS
Encapsulamiento	Recupera la rigidez en un 12,3%	(Mostavi et al., 2015)

Encapsulamiento	Recupera en un 17% de carga	(Kanellopoulos et al., 2015a)
Encapsulamiento	Recupera la flexión en un 26,2%	(Pelletier et al., 2013)
Almacenado en esponja y cera	Recupera la rigidez y la flexión en un 30%	(Huang & Ye, 2011)

Nota: Adecuación propia con base en datos de Sidiq et al. (2019).

El óxido de magnesio no ha sido aun tan investigado, sin embargo es implementado para reducir potencialmente el ancho de las grietas, ya que varía el volumen como resultado de la interacción entre las partículas cementosas y el óxido de magnesio, generando productos de carbonato de magnesio, solo si hay presencia de agua (Kanellopoulos et al., 2015; Qureshi y Al-Tabbaa, 2014). Algunos métodos para incorporar el óxido de magnesio se indican en la tabla 27 con su porcentaje de eficacia en la recuperación de sus propiedades mecánicas.

TABLA 27. Mejora del concreto por método de incorporación de óxido de magnesio

MÉTODO	EFICACIA	REFERENCIAS
Mezclado con hormigón	Recupera la resistencia a flexión en un 5%	(Kanellopoulos et al., 2015a)
Encapsulamiento	Recupera la carga en un 6%	(Qureshi & Al-Tabbaa, 2016)
Encapsulamiento	Recupera la carga en un 12%	(Qureshi et al., 2016)
Mezclado con arcilla bentonita	Mejora la fuerza en un 65%	(Qureshi & Al-Tabbaa, 2014)

Nota: Adecuación propia con base en datos de Sidiq et al. (2019).

Los hongos alcalofilos también se han implementado como agentes autorreparadores del concreto (Baluška et al., 2006). Los hongos cuentan con gran capacidad de sobrevivir incluso si se exponen a ambientes extremos, como temperatura, altas presiones, radiación, salinidad, acidez variable y luz ultravioleta intensa (Chávez et al., 2015; Sterflinger et al., 2012). Las paredes celulares de los hongos cuentan con una sustancia llamada Quintina la cual es un polímero de carbohidratos que forman energía para atraer iones minerales a sus paredes celulares y así depositar los minerales (Roncero, 2002). Esto genera carbonato de calcio, esta reacción es producida por el agua y el oxígeno que se filtra entre las grietas del concreto, permitiendo germinar a las esporas (Luo et al., 2018).

A continuación se presentan los hongos más implementados que muestran su mayor crecimiento a temperaturas de 30 °C:

- Trichoderma reesei
- Aspergillus nidulans
- Cadophora interclivum
- Umbeliopsis dimorpha
- Acidomelania panicicola
- Pseudophialophora magnispora

Para tener un claro ejemplo del proceso de la autoreparación autónoma, se indica el tercer caso, en el cual implementan esporas bacterianas de Bacillus Pseudofirmus y lactato de calcio, como se presentan en la tabla 28, con los materiales principales para el diseño del concreto, cada uno contiene sus características y cantidades.

TABLA 28. Caso 3 autorreparación autónoma

AUTORREPARACIÓN AUTÓNOMA		
CASO 3	MATERIALES DEL CONCRETO	CANTIDADES (Kg/m ³)
Espécimen prismático de 40*40*160 mm	Cemento Portland	530
	Arena	690
	Arcilla expandida	300
	Agua	265
	Acero galvanizado	1
	Lactato de calcio	1
	Bacterias	--

Nota: Elaboración propia con base en datos de Gonzalez et al., (2018).

Este caso tres consistió en estabilizar la bacteria para estar en la fase esporulada, en este estado resiste a la fabricación del concreto. Para la preparación de los especímenes se elaboran cuatro tipos de mezcla, la primera es de control, la segunda con la arcilla impregnada de bacterias, la tercera con lactato de calcio y la cuarta con todos los elementos, cada uno con el acero de refuerzo para controlar la formación de fisuras. Se desmolda a las 24 horas, para luego dejarlo en un cuarto con temperatura de 20 ± 2 ° C y humedad > 95% por 28 días, luego se procede a hacer el ensayo de flexión en tres puntos para formar las fisuras, luego se sumerge en agua, y se analizan al día cero y catorce, en este último se observó sellado de grietas de hasta

0.26 mm de espesor en presencia de bacterias mientras que en los otros casos no se evidenció sellado (Gonzalez et al., 2018).

4.3. Otros.

Actualmente se han venido comercializando materiales para el sellado de grietas, se describen algunos productos de Xypex y Sika en la tabla 29, estos materiales se caracterizan por ser impermeabilizantes por cristalización sellando las grietas; Los productos de Xypex son generalmente aplicados por recubrimiento mientras que los de Sika manejan una serie de productos aplicados por inyección. Estos productos en general no aportan a la autoreparación, sin embargo tienen un comportamiento similar, ya que se forman cristales los cuales sellan las grietas y protegen la capa superficial de la estructura, prolongando su vida útil a diferencia de las estructuras de materiales comunes, pero de forma mecánica.

TABLA 29. Materiales diseñados para el sellado de grieta.

MATERIALES	DESCRIPCIÓN	PRESENTACIÓN	RENDIMIENTO
Xypex FCM 80 Sello de grietas de 1.5 mm	Está diseñado para la reparación de grietas, sellado de juntas, restauración de concreto deteriorado e impermeabilización por cristalización	Cada kit contiene 4 L de líquido y 10 Kg de polvo	2,6 m ² con un espesor de 3 mm para dos capas
Xypex Concentrado Sello de grietas de 0.4 mm.	Tratamiento químico para la impermeabilización, protección y reparación del concreto, sella juntas, reparación de grietas debido a la formación de cristales.	En canecas de 25, 10, 5, y 1,25 kg	De 1 m ² a 2 m ²
Xypex Pach And Plug	Es un cemento hidráulico de fraguado rápido para parchar, se usa para sellar grietas, orificios y defectos del concreto.	En canecas de 25, 10, 5, y 1,25 kg	1 kg rinde 0,645 L de concreto.
Xypex Concentrado S-1 Sello de grietas de 0.4 mm	Está diseñado para impermeabilizar y brindar protección contra sustancias químicas agresivas, dentro de los poros y los tractos capilares del concreto y así evitar la descamación, pulverización y deslaminación.	En canecas de 25 Kg	1 kg por m ² , espolvoreado

SikaTop-Seal 107 Sello de grietas entre 0.15 a 6 mm.	Es un impermeabilizante semi flexibles, a base de polímeros y cemento, considerado como revestimiento de protección.	20 kg polvo	2 mm son iguales a 20 mm de concreto normal
---	--	-------------	---

Nota: Elaboración propia con base en datos de (Sika, 2018; Xypex, 2021).

5. PRESUPUESTO MATERIALES

En las tablas 30 y 31 se elabora una estimación del valor unitario y valor por metro cúbico de los materiales implementados para la autorreparación y sellado de grietas mencionados en los enunciados anteriores, dichos valores se obtuvieron por la tienda virtual de Homecenter.

TABLA 30. Presupuesto de los casos presentados de autoreparación

AUTORREPARACIÓN	MATERIALES	UND.	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL (\$ / m3)	
AUTÓGENA	CASO 1	Cemento CEM I 42.5R de Lafarge	Kg	\$500	\$137.500
		Agregado grueso calcáreos triturados (4-12 mm)	Kg	\$200	\$181.600
		Arena calcáreos	Kg	\$200	\$197.600
		Polvo piedra caliza	Kg	\$1.100	\$55.000
		Superplastificante Sika ViscoCrete-5980	Kg	\$10.300	\$51.500
		Fibras de acero (35 mm longitud y 0.55 mm diámetro)	Kg	\$11.100	\$444.000
		Agua	m3	\$2.210	\$364.650
		Total			

CASO 2	Cemento CEM I 52.5R	Kg	\$500	\$300.000
	Escoria	Kg	--	--
	Arena (0-2mm)	Kg	\$200	\$196.400
	Superplastificante Sika ViscoCrete-5980	Kg	\$10.300	\$339.900
	Aditivo cristalinos	Kg	\$43.900	\$210.720
	Fibras de acero (20 mm longitud y 0.22 mm diámetro)	Kg	\$11.100	\$1.332.000
	Nano-fibras de alúmina (100 - 900 nm longitud y 4-11nm diámetro)	Kg	\$3.000	\$4.500
	Agua	m3	\$2.210	\$442.000
	Total			
AUTÓNOMA CASO 3	Cemento Portland	Kg	\$500	\$265.000
	Arena	Kg	\$200	\$138.000
	Arcilla expandida	Kg	\$200	\$60.000
	Agua	m3	\$2.210	\$585.650
	Acero galvanizado	Kg	\$8.400	\$8.400
	Lactato de calcio	Kg	\$39.900	\$39.900
	Bacterias	Kg	--	--
	Total			

Nota: Elaboración propia con base en datos de Homecenter.

TABLA 31. Presupuesto de los materiales presentados como alternativa de sellado de grietas

AUTORREPARACIÓN	MATERIALES	UND.	VALOR UNITARIO
OTRAS ALTERNATIVAS	Xypex FCM 80	ML	\$23.565
	Xypex Concentrado	Kg	\$31.236

Xypex Pach And Plug	Kg	\$38.320
Xypex Concentrado S-1	Kg	\$16.356
SikaTop-Seal 107	Und.	\$132.900

Nota: Elaboración propia con base en datos de Homecenter.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las tecnologías descritas anteriormente han presentado una serie de ventajas para su aplicación a futuro, sin embargo presentan desventajas que se deben tener en cuenta en la implementación del concreto autorreparable, como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 30. Ventajas y desventajas del uso del concreto autorreparable

TECNOLOGÍAS	MATERIALES	VENTAJAS	DESVENTAJAS
AUTÓGENA	Escoria, ceniza volante y agua	<ul style="list-style-type: none"> -Se pueden implementar materiales de soporte para mantener las grietas controladas. -En inmersión en agua se genera más la autorreparación. -Necesita menos energía. -Genera menos emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente. -A temperaturas de 35 °C aún se genera la autorreparación. 	<ul style="list-style-type: none"> -No genera autoreparación en ambientes húmedos. -No existe un sellado interno de las grietas. -Las grietas más grandes no presentan autorreparación.
AUTÓNOMA	Bacterias	<ul style="list-style-type: none"> -Las bacterias son fáciles de cultivar y manipular. -Son inofensivas para los seres humanos. - A una temperatura de 23 °C se presenta una alta autorreparación. -Protege los refuerzos de acero contra la corrosión. -Disminución de la absorción del agua. 	<ul style="list-style-type: none"> -Se mueren cuando no hay disponibilidad de nutrientes. -Con temperaturas extremas no genera autorreparación. -No resiste cambios bruscos de temperatura, pH y condiciones secas del concreto. -Con dosis superiores al 3% de bacterias en relación a la mezcla del concreto, disminuye su resistencia a la tracción. -La resistencia a la compresión disminuye con dosis de 1% de bacterias en relación a la mezcla del concreto. -Son más costosos porque requieren equipos especiales.

	<ul style="list-style-type: none"> -Son más económicos. -Es versátil. -Son eficaces en la curación de grietas. -Reducen costos de mantenimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> -Es insuficiente la recuperación de las propiedades mecánicas si no se aplica otros componentes. -Poca adherencia. -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos.
	<ul style="list-style-type: none"> - Reduce y cura el ancho de las grietas. -Reduce las contracciones del hormigón. -Con una baja utilización del material genera una alta resistencia. -Soporta alta humedad. 	<ul style="list-style-type: none"> -Solo en presencia de agua ocurre la precipitación. -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos.
	<ul style="list-style-type: none"> -Aumenta la durabilidad y la resistencia del concreto -Rellena grietas y poros. -Aumenta la resistencia de cicatrización. 	<ul style="list-style-type: none"> -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos.
	<ul style="list-style-type: none"> -Son más resistentes a temperaturas y ambientes extremos, alta radiación, presión, salinidad, acidez variable y luz ultravioleta. -Soportan pH altos. -Tienen una vida más prolongada. -No son patógenos. -Son amigables con el medio ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Obtención del hongo, ya que crecen en ambientes extremos. -Se requieren más investigaciones sobre su comportamiento en la recuperación de las propiedades mecánicas del concreto y su supervivencia a largo plazo. -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos.
Otros	<ul style="list-style-type: none"> -Soporta climas extremos. -Impermeabilizante y sella grietas. -Flexibles. -Prolonga su durabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> -Proteger de la lluvia o agua hasta que se seque. -No debe tener contacto con el acero de refuerzo. -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos.
	<ul style="list-style-type: none"> -Sella grietas e impermeabiliza. -Permite que respire el concreto. -Aumenta la calidad de vida útil. 	<ul style="list-style-type: none"> -Si hay filtraciones o flujo directo de agua se deben implementar otros materiales. -No debe tener contacto con el acero de refuerzo. -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos.
	<ul style="list-style-type: none"> -Autosellado de grietas por cristalización. -Compatible con los sustratos del 	<ul style="list-style-type: none"> -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos. -Actúa únicamente en presencia de agua.

	<p>concreto. -No es tóxico.</p>	
Concentrado DS-1	<p>-Sella grietas e impermeabiliza. -Permite que respire el concreto. -Aumenta la calidad de vida útil. -Son menos costosos.</p>	<p>-No aporta significativamente a la autorreparación. -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos. -En ambientes húmedos se debe aplicar un sellante.</p>
El Sika Top - Seal 107	<p>-Sella grietas e impermeabiliza. -Aumenta la calidad de vida útil. -Tiene buen soporte. -Resiste al ozono. -Resistencia al hielo y deshielo. -Frena la carbonatación. -No es corrosivo.</p>	<p>-No aporta significativamente a la autorreparación. -Aún se desconoce su comportamiento en pavimentos. -En las primeras horas de aplicarse se debe proteger de la lluvia, salpicaduras y heladas. -Solo se puede implementar en obras de exposición hidráulica.</p>

Nota: Elaboración propia.

-El método autógeno reduce la producción de dióxido de carbono, ya que disminuye la implementación del cemento por adicionar la escoria o cenizas volantes, además manejan el mismo sistema que en la antigua Roma o Egipto, al implementar cenizas volantes conocidas también como cenizas volcánicas. Adicionalmente, se pueden usar otros materiales que dan soporte mitigando y controlando la aparición de grietas.

-Las bacterias se ven como una alternativa considerable, sin embargo se ha demostrado que, a condiciones extremas o falta de nutrientes se reduce su supervivencia, lo cual dificultaría la autorreparación en los pavimentos de concreto.

-Los polímeros presentan una gran gama de aplicaciones, ya que pueden ser agentes curativos, así como material de cubierta para las cápsulas, además soportan temperaturas extremas, y con la implementación de otros materiales puede recuperar las propiedades mecánicas considerablemente.

-Los componentes químicos presentan grandes resultados en la autorreparación, y recuperación de las propiedades mecánicas, sin embargo esto solo ocurre en presencia de agua para generar las reacciones, siendo un aspecto complicado para los pavimentos permanecer en presencia continua de agua.

-Los hongos son una gran alternativa autorreparadora, y de recuperación de las propiedades mecánicas, adicionalmente soporta condiciones extremas, sin embargo se debe investigar su comportamiento a la fricción, resistencia a la compresión, tensión, y el paso del constante tráfico a largo plazo, además de otros aspectos.

-Los materiales que ya se encuentran comercializados, en general son usados para la reparación e impermeabilización del concreto, aún se desconoce su comportamiento para implementar en pavimentos altamente transitados.

7. CONCLUSIONES

Los agentes mencionados anteriormente se encuentran en las siguientes fases de desarrollo: 1) fase de contextualización, 2) fase de validación de componentes, 3) fase de demostrado en sistema con condiciones operativas y 4) fase de implementación en sistemas reales operativos (Roig et al., 2021), sin embargo los adhesivos cristalinos son los únicos que han alcanzado la fase 4, dejando así, grandes incógnitas en el campo de investigación sobre el uso cada agente para la autorreparación del concreto, y su aplicación en los pavimentos.

Los agentes más recomendados para implementar en el diseño de pavimentos rígidos, son los empleados en los métodos autógenos, ya que disminuyen las emisiones de CO₂, además, su recuperación de las propiedades mecánicas es considerable, aunque en la producción de grandes grietas se deben implementar otras alternativas, como utilizar productos de Xypes o Sika para el sellado e impermeabilización del pavimento, y así mitigar la generación de grietas, sin embargo se debe evaluar su comportamiento para el tránsito constante, y su porosidad para evitar accidentes de tránsito por pavimentos lisos.

De los agentes autónomos se destacan los hongos, aunque no se cuentan con investigaciones específicas para su uso en pavimentos rígidos, generan grandes expectativas, debido a su comportamiento a temperaturas o condiciones extremas, lo cual es conveniente para el diseño de pavimentos rígidos; También otra alternativa, son los polímeros que se caracterizan por ser resistentes a temperaturas extremas, y con ayuda de otros compuestos suplementarios de soporte, pueden recuperar la resistencia del concreto.

Con la recopilación de información, se identificaron las tecnologías para el diseño de concretos autorreparables, analizando sus características principales, esto permitió establecer las ventajas y desventajas de su implementación en un pavimento rígido, convirtiéndolo en un material

amigable con el medio ambiente. De los métodos evaluados, ninguno demostró una aplicación adecuada enfocada a pavimentos rígidos, sin embargo surgen una serie de incógnitas para futuras investigaciones.

El trabajo realiza las estimaciones para las cotizaciones de los materiales, en diferentes casos de autorreparación, demostrando que este tipo de material reducirá los costos de mantenimiento.

8. AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirme tener y disfrutar de personas incondicionales como lo es mi familia, mis amigos y amigas, a cada conocido, que de una u otra manera aportaron a mi crecimiento, a mis propósitos, a la culminación de mis metas tanto personales como profesionales y sobre todo por permitirme tener salud.

No ha sido un camino fácil hasta ahora, pero gracias a cada persona incondicional por su aporte, su apoyo, su bondad, su amistad, su amor y confianza que facilitaron el proceso, y hoy que culmina esta meta quiero agradecerles y que quede en memoria que cada esfuerzo tiene su contribución.

9. ANEXO ARTÍCULO

10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO. (1993). *Design of pavement structures*.

<https://habib00ugm.files.wordpress.com/2010/05/aashto1993.pdf>

Alarcón, C., & Restrepo, L. (2018). Inspección visual de tramos de vía en el límite de villa del prado con el barrio el dorado, hasta la intersección de la avenida del poblado i con la avenida sur, de la ciudad de Pereira, Risaralda [pasantía internacional universidad nacional autónoma de México]. In *UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL PEREIRA*.

Argos. (2014, 11 25). *Tipos de deterioro en pavimentos de concreto*. www.argos.com.co

Arquitectura e Ingeniería. (2018, septiembre 27). Las Impresoras de calzadas: Una solución de urbanismo – Arquide Estudio. *Arquitectura e Ingeniería*.

<https://www.arquidestudio.com/las-impresoras-de-calzadas-una-solucion-de-urbanismo/>

ASCP. (2020, Julio). PAVIMENTOS DE HORMIGÓN SOSTENIBLES. *PAVIMENTOS NOTA*, (002). <https://concretepavements.com.au/wp-content/uploads/2021/04/ASCP-Pavimentos-Nota-002-Pavement-Note-Pavimentos-de-Hormigon-Sostenibles-Reducido-Impacto-Ambiental-de-Los-Pavimentos-de-Hormigon-Espanol-1.pdf>

Badillo, J., & Rodríguez, R. (2004). *Mecánica de suelo* (Vol. 2). Limusa.

Baluška, F., Volkmann, D., & Barlow, P. W. (2006). Cell-cell channels and their implications for cell theory. *Cell-Cell Channels*, 1-18. Scopus.

Barajas, E., & Buitrago, B. (2017). análisis comparativo del sistema de gestión de los pavimentos o mantenimiento vial de la ciudad de Bogotá con la ciudad de Sao Paulo [Tesis]. In *UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA*. Bogotá, Colombia.

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15235/1/AN%C3%81LISIS%20COMPARATIVO%20DEL%20SISTEMA%20DE%20GESTI%C3%93N%20DE%20LOS%20PAVIMENTOS%20O%20MANTENIMIENTO%20VIAL%20DE%20LA%20CIUDA D%202.pdf>

Brockenbrough, R. L. (2009). *Highway Engineering Handbook: Building and Rehabilitating the Infrastructure, Third Edition*. McGraw-Hill Education.

<https://ezproxy.uan.edu.co:2107/content/book/9780071597630/chapter/chapter3>

Calla, E. (2015). Pavimentación de los jirones Achaya, Manco Capac, Conde de Lemus, Arica y Puno de la municipalidad distrital de Caminacaazángaro [Tesis]. In

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO. Puno, Perú. Retrieved 2021, from http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/1862/Calla_Mamani_Efrain_Albert.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Cement & Concrete Association Of New Zealand (CCANZ). (2013). *Benefits of Building Concrete Roads in New Zealand*. Wellington. https://cdn.ymaws.com/concretenz.org.nz/resource/resmgr/docs/ccanz/ccanz_ms23.pdf

Chávez, R., Fierro, F., García-Rico, R. O., & Vaca, I. (2015). Filamentous fungi from extreme environments as a promising source of novel bioactive secondary metabolites. *Frontiers in Microbiology*, 6, 903. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00903>

Chen, J. J., Thomas, J. J., Taylor, H. F. W., & Jennings, H. M. (2004). Solubility and structure of calcium silicate hydrate. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1499-1519. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.034>

Cuenca, E., D'Ambrosio, L., Lizunov, D., Tretjakov, A., Volobujeva, O., & Ferrara, L. (2021). Mechanical properties and self-healing capacity of Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete with alumina nano-fibres: Tailoring Ultra High Durability Concrete for aggressive exposure scenarios. *Cement and Concrete Composites*, 118, 103956. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103956>

Cuenca, E., Tejedor, A., & Ferrara, L. (2018). A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. *Construction and Building Materials*, 179, 619-632. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.261>

Day, R. W. (2012). *Geotechnical Engineer's Portable Handbook, Second Edition*. McGraw-Hill Education. <https://ezproxy.uan.edu.co:2107/content/book/9780071789714>

De Belie, N., Gruyaert, E., Al-Tabbaa, A., Antonaci, P., Baera, C., Bajare, D., Darquennes, A., Davies, R., Ferrara, L., Jefferson, T., Litina, C., Miljevic, B., Otlewska, A., Ranogajec, J., Roig-Flores, M., Paine, K., Lukowski, P., Serna, P., Tulliani, J.-M., ... Jonkers, H. M. (2018). A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of

Structures. *Advanced Materials Interfaces*, 5(17), 1800074.

<https://doi.org/10.1002/admi.201800074>

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*, 3(2), 118-123. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/3/2/006>

Fagerlund, G., & Hassanzadeh, M. (2010). *SELF-HEALING OF CRACKS IN CONCRETE LONG-TERM EXPOSED TO DIFFERENT TYPES OF WATER*. 61.

Feiteira, J., Gruyaert, E., & De Belie, N. (2016). Self-healing of moving cracks in concrete by means of encapsulated polymer precursors. *Construction and Building Materials*, 102, 671-678. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.192>

Fick, G., Taylor, P., Christman, R., & Ruiz, J. M. (2012). *Field Reference Manual for Quality Concrete Pavements*. 129.

Francia, N., & Hilton, A. (2012, 04 13). Diseño y Conservación de Pavimentos Rígidos. In *Diseño y Conservación de Pavimentos Rígidos*. Universidad Nacional Autónoma de México (p. 34). México.

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/504/A6%20Dise%C3%B1o%20de%20Pavimentos%20R%C3%ADgidos.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Giannaros, P., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Sealing of cracks in cement using microencapsulated sodium silicate. *Smart Materials and Structures*, 25(8). Scopus. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084005>

Gilabert, F. A., Van Tittelboom, K., Van Stappen, J., Cnudde, V., De Belie, N., & Van Paepegem, W. (2017). Integral procedure to assess crack filling and mechanical contribution of polymer-based healing agent in encapsulation-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 77, 68-80. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.001>

Giraldo, N. (2017, Mayo). Autorreparación de fisuras en concreto rígido para pavimentos mediante la adición de bacterias bioprecipitadoras de carbonato de calcio.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.

<http://bdigital.unal.edu.co/58369/1/1019037797.2017.pdf>

Gonzalez, A., Parraguez Macaya, A., Corvalan, L., Correa, N., & Stuckrath, C. (2018, octubre 7). *HORMIGÓN AUTORREPARABLE CON BACTERIAS PARA LA INFRAESTRUCTURA VIAL* Autores.

González, G., & Vanegas, E. (2016). Comparación de las metodologías AASHTO y PCA para el diseño de pavimento rígido [Tesis]. In *Universidad de Cartagena* (p. 41). Cartagena, Colombia.

<https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/5759/DOCUMENTO%20FINAL%20%28metodos%20de%20dise%c3%b1o%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Grove, J. (2006). Concrete Pavement Construction Basics: Tech Note. *National concrete pavement technology center*.

http://publications.iowa.gov/13145/1/ConstructionBasicsTechNote_000.pdf

Gruyaert, E., Debbaut, B., Snoeck, D., Díaz, P., Arizo, A., Tziviloglou, E., Schlangen, E., & De Belie, N. (2016). Self-healing mortar with pH-sensitive superabsorbent polymers: Testing of the sealing efficiency by water flow tests. *Smart Materials and Structures*, 25(8). Scopus. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084007>

Han, N.-X., & Xing, F. (2017). A Comprehensive Review of the Study and Development of Microcapsule Based Self-Resilience Systems for Concrete Structures at Shenzhen University. *Materials*, 10(1), 2. <https://doi.org/10.3390/ma10010002>

Hearn, N. (1998). Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? *Materials and Structures*, 31(8), 563. <https://doi.org/10.1007/BF02481539>

Hernández, D. (2019). *HISTORIA DE LOS PAVIMENTOS*. Timetoast.

<https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-los-pavimentos-cc727c2c-cd7a-4b06-90bb-9d854c28b021>

Huang, H., & Ye, G. (2011). *Application of sodium silicate solution as self-healing agent in cementitious materials*. RILEM Publications SARL.

https://www.rilem.net/publication/publication/407?id_papier=7583

Huang, H., Ye, G., & Damidot, D. (2014). Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 60, 68-82.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.010>

Huang, Y. (2004). *Pavement analysis and design*. New york.

IDU. (2013). Guía diseño de pavimentos para bajos volúmenes de tránsito y vías locales para Bogotá. In *Instituto de Desarrollo Urbano*. Bogotá, Colombia.

Invias. (2006). *Estudió e investigación del estado actual de las obras de la red Nacional de carreteras*. Retrieved 2021, from <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/manuales-de-inspeccion-de-obras/664-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-rigidos/file>

Invias. (2008). *Manual de diseño de pavimentos de concreto para vías con bajos, medios y altos volúmenes de tránsito*. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/3807-manual-de-diseno-de-pavimentos-de-concreto-para-vias-con-bajos-medios-y-altos-volumenes-de-transito/file>

Jaimes, A. (2020). GUÍA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS RÍGIDOS EN VÍAS URBANAS CON APLICACIÓN EN MUNICIPIOS CON POBLACIONES MENORES A 50 000 HABITANTES [Tesis]. In *UNIVERSIDAD SANTO TOMAS SECCIONAL TUNJA*. Tunja, Colombia.

<https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30448/2020Andresjaimes.pdf?sequence=1>

Jennings, H. M. (2000). Model for the microstructure of calcium silicate hydrate in cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 101-116. Scopus.

[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00209-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00209-4)

- Jonkers, H. (2011). Bacteria-based self-healing concrete. *Heron Journal*, 56, 12. <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A8326f8b3-a290-4bc5-941d-c2577740fb96>
- Joseph, C., Jefferson, A. D., Isaacs, B., Lark, R., & Gardner, D. (2010). Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials. *Magazine of Concrete Research*, 62(11), 831-843. Scopus. <https://doi.org/10.1680/mac.2010.62.11.831>
- Kan, Y.-C., Yen, T., & Lee, M.-G. (2008). Restored strength of cracked concrete beam repaired by epoxy and polymethyl methacrylate. *ACI Materials Journal*, 105(5), 451-458. Scopus.
- Kanellopoulos, A., Qureshi, T. S., & Al-Tabbaa, A. (2015a). Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. *Construction and Building Materials*, 98, 780-791. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.127>
- Kanellopoulos, A., Qureshi, T. S., & Al-Tabbaa, A. (2015b). Glass encapsulated minerals for self-healing in cement based composites. *Construction and Building Materials*, 98, 780-791. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.127>
- Li, W., Jiang, Z., Yang, Z., Zhao, N., & Yuan, W. (2013). Self-healing efficiency of cementitious materials containing microcapsules filled with healing adhesive: Mechanical restoration and healing process monitored by water absorption. *PLoS ONE*, 8(11). Scopus. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0081616>
- Londoño, C. (n.d.). *CONCEPTOS BÁSICOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS DE CONCRETO*. Argos 360. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/disen-de-pavimentos-de-concreto>
- Londoño, C. (n.d.). *Historia y orígenes de los pavimentos de concreto en Colombia*. 360 en concretos Argos. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/historia-de-pavimentos-de-concreto-en-colombia>

Luo, J., Chen, X., Crump, J., Zhou, H., Davies, D. G., Zhou, G., Zhang, N., & Jin, C. (2018). Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 164, 275-285.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.233>

Magazine, A. & Techxplore. (2018). *Self-Healing Materials, Paving the Road of the Future*. IMNOVATION. <https://www.imnovation-hub.com/science-and-technology/self-healing-materials-road-future/>

Malinskii, Yu. M., Prokopenko, V. V., Ivanova, N. A., & Kargin, V. A. (1970). Investigation of self-healing of cracks in polymers. *Polymer Mechanics*, 6(2), 240-244.

<https://doi.org/10.1007/BF00859196>

Milla, E. (2017, 01 21). Diseño por el método de la portland cement asociation. In *Universidad Nacional de Santiago Antunez de Mayolo*.

Mostavi, E., Asadi, S., Hassan, M. M., & Alansari, M. (2015). Evaluation of Self-Healing Mechanisms in Concrete with Double-Walled Sodium Silicate Microcapsules. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(12), 04015035.

[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001314](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001314)

Muynck, W., Belie, N., & Verstraete, W. (2010, Febrero). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*, 36, 118-136.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092585740900113X>

Muzenski, S., Flores-Vivian, I., & Sobolev, K. (2019). Ultra-high strength cement-based composites designed with aluminum oxide nano-fibers. *Construction and Building Materials*, 220, 177-186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.175>

Muzenski, S., Flores-Vivian, I., & Sobolev, K. (2020). Hydrophobic modification of ultra-high-performance fiber-reinforced composites with matrices enhanced by aluminum oxide nano-fibers. *Construction and Building Materials*, 244, 118354.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118354>

Pelletier, M. M., Brown, R., Shukla, A., & Bose, A. (2013). *Self-healing concrete with a microencapsulated healing agent*. Available online:

<Http://energetics.chm.uri.edu/system/files/Self%20healing%20concrete%20-7-11.pdf>
(accessed on 17.

Qureshi, T. S., & Al-Tabbaa, A. (2014). The effect of magnesia on the self-healing performance of Portland cement with increased curing time. *1st International Conference on Ageing of Materials & Structures*. https://www.researchgate.net/profile/Farhad-Pargar/publication/342926155_AMS14ProceedingsTUDelftMay2014r/links/5f0df17e92851c1eff0fa8d5/AMS14ProceedingsTUDelftMay2014r.pdf#page=659

Qureshi, T. S., & Al-Tabbaa, A. (2016). Self-healing of drying shrinkage cracks in cement-based materials incorporating reactive MgO. *Smart Materials and Structures*, 25(8). Scopus. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/8/084004>

Qureshi, T. S., Kanellopoulos, A., & Al-Tabbaa, A. (2016). Encapsulation of expansive powder minerals within a concentric glass capsule system for self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 121, 629-643. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.030>

Redondo, N. (2012). *Historia de Los Pavimentos en Colombia*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/283739042/Historia-de-Los-Pavimentos-en-Colombia>

Rens, L. (2009). Concrete Roads: A Smart and Sustainable Choice. In *European Concrete Paving Association* (p. 36). Brussels. <https://www.eupave.eu/wp-content/uploads/eupave-sustainable-concrete-roads.pdf>

Robinson, C. H. (2001). Cold adaptation in Arctic and Antarctic fungi. *New Phytologist*, 151(2), 341-353. Scopus. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2001.00177.x>

Robles, R. (2018). DISEÑO DE UN PAVIMENTO RÍGIDO PARA EL SEGMENTO VIAL DE LA CARRERA 2 ESTE ENTRE LA CALLE 41 B SUR Y CALLE 42 A SUR DEL BARRIO LA VICTORIA LA LOCALIDAD DE SAN CRISTÓBAL DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ. [Tesis]. In *UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA*.

Bogotá, Colombia.

<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/20452/RoblesRoblesRamiroHernan2018.pdf?sequence=1>

Rodon, H., & Reyes, F. (2015). *PAVIMENTOS, MATERIALES, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO*. E Libro.

<https://ezproxy.uan.edu.co:2830/es/ereader/bibliouan/70435?page=568>

Roig, M., & Serna, P. (2020). Concrete Early-Age Crack Closing by Autogenous Healing. *Sustainability*, 12(11), 4476. <https://doi.org/10.3390/su12114476>

Roig, M., Formagini, S., & Serna, P. (2021). Self-healing concrete-What Is it Good For? *Materiales de Construcción*, 71(341), e237-e237. <https://doi.org/10.3989/mc.2021.07320>

Roig, M., Pirritano, F., Serna, P., & Ferrara, L. (2016). Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Construction and Building Materials*, 114, 447-457.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.196>

Roncero, C. (2002). The genetic complexity of chitin synthesis in fungi. *Current Genetics*, 41(6), 367-378. Scopus. <https://doi.org/10.1007/s00294-002-0318-7>

Salazar, A. (2015). *Guía para diseño y construcción de pavimentos rígidos* (2nd ed.). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C. <https://docplayer.es/73959847-Guia-para-el-diseno-y-construccion-de-pavimentos-rigidos-Ing-aurelio-salazar-rodriguez.html>

Sangadji, S. (2017). Can Self-healing Mechanism Helps Concrete Structures Sustainable? *Procedia Engineering*, 171, 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.331>

Sidiq, A., Gravina, R., & Giustozzi, F. (2019). Is concrete healing really efficient? A review. *Construction and Building Materials*, 205, 257-273.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.002>

- Sidiq, A., Setunge, S., Gravina, R. J., & Giustozzi, F. (2020). Self-repairing cement mortars with microcapsules: A microstructural evaluation approach. *Construction and Building Materials*, 232, 117239. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117239>
- Sika. (2018). *Sika MonoTop®-107 Seal. 01*, 3.
- Sterflinger, K., Tesei, D., & Zakharova, K. (2012). Fungi in hot and cold deserts with particular reference to microcolonial fungi. *Fungal Ecology*, 5(4), 453-462. Scopus. <https://doi.org/10.1016/j.funeco.2011.12.007>
- Suleiman, A. R., & Nehdi, M. L. (2018). Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 111, 197-208. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.009>
- Toirac, J. (2004). *Patología de la construcción grietas y fisuras en obras de hormigón* (1st ed., Vol. 29). origen y prevención Ciencia y Sociedad. <https://www.redalyc.org/pdf/870/87029104.pdf>
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2003). Cooling Summertime Temperatures: Strategies to Reduce Urban Heat Islands. In *US EPA*. Washington, D.C. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-06/documents/hiribrochure.pdf>
- Van Dam, T. J., United States, Federal Highway Administration, Iowa State University, & National Concrete Pavement Technology Center. (2012). *Sustainable concrete pavements: A manual of practice*. National Concrete Pavement Technology Center, Iowa State University. http://ntl.bts.gov/lib/43000/43500/43507/Sustainable_Concrete_Pavement_508.pdf
- Van Dan, T., Taylor, P., Fick, G., Greess, D., VanGeem, M., & Lorenz, E. (2012). Sustainable concrete paviments: A manual of practice. *National concrete pavement techenology center*.
- Van Tittelboom, K., De Belie, N., Van Loo, D., & Jacobs, P. (2011). Self-healing efficiency of cementitious materials containing tubular capsules filled with healing agent.

Cement and Concrete Composites, 33(4), 497-505. Scopus.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.01.004>

Van, K., & De Belie, N. (2013). Self-Healing in Cementitious Materials—A Review.

Materials, 6(6), 2182-2217. <https://doi.org/10.3390/ma6062182>

Verian, K. P., Whiting, N. M., Olek, J., Jain, J., & Snyder, M.B. (2013). Using Recycled Concrete as Aggregate in Concrete Pavements to Reduce [FHWA/IN/JTRP-2013/18.]. In *Department of Transportation and Purdue University*. Transportation Research Program.

<https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/26862>

Vijay, K., Murmu, M., & Deo, S. V. (2017). Bacteria based self healing concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 152, 1008-1014.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.040>

Villareal, F. (2008). *Rehabilitación de pavimentos rígidos*. Bogotá.

Wang, X. F., Yang, Z. H., Fang, C., Han, N. X., Zhu, G. M., Tang, J. N., & Xing, F. (2019). Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious materials – its methods and future development: A review. *Construction and Building Materials*, 212, 400-421. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.117>

White, S. R., Sottos, N. R., Geubelle, P. H., Moore, J. S., Kessler, M. R., Sriram, S. R., Brown, E. N., & Viswanathan, S. (2001). Autonomic healing of polymer composites.

Nature, 409(6822), 794-797. <https://doi.org/10.1038/35057232>

Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites*, 33(7), 763-770.

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.03.012>

Xypex. (2021). *Xypex Productos*. <https://www.xypex.com/colombia/products>

Yang, Z., Hollar, J., He, X., & Shi, X. (2010). Laboratory assessment of a self-healing cementitious composite. *Transportation Research Record*, 2142, 9-17. Scopus.

<https://doi.org/10.3141/2142-02>

Yıldırım, G., Khiavi, A. H., Yeşilmen, S., & Şahmaran, M. (2018). Self-healing performance of aged cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 87, 172-186. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.01.004>

Zorio Blanco, V. (1987, Enero). Breve historia de las carreteras. *Obras publicas*, 27-38. http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1987/1987_enero_3254_04.pdf

Zuluaga, A. (2020). Clase diseño de pavimentos. In *Universidad Antonio Nariño*. Bogotá.