



**Tecnológico Nacional de México
Instituto Tecnológico de Chetumal**



Tesis:

**Estudio de la carbonatación del concreto con agregado
reciclado modificado con adición de bacteria
*Sporosarcina pasteurii***

Que para obtener el grado de:
Maestría en Construcción

Que presenta:

Ing. Javier Rodrigo Nahuat Sansores

Director:

Dr. Luis Felipe Jiménez Torrez

Chetumal, Quintana Roo, México
Agosto de 2021

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD Y AUTENTICIDAD

Por medio de la presente, ING. JAVIER RODRIGO NAHUAT SANSORES declaro que el trabajo de investigación titulado ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO MODIFICADO CON ADICIÓN DE BACTERIA SPOROSARCINA PASTEURII y dirigido por DR. LUIS FELIPE JIMÉNEZ TORREZ como tema de tesis para la obtención del Título de MAESTRO(A) EN CONSTRUCCIÓN, es original. El presente trabajo de investigación es el resultado de mi trabajo personal, el cual no ha sido copiado de investigaciones previas publicadas en medios digitales y/o impresos. Las ideas, definiciones y/o ilustraciones tomadas de trabajos previos han sido citadas de la manera correcta para dar crédito a los autores originales. Declaro que el presente trabajo de investigación no ha sido presentado anteriormente para obtener algún grado académico o título, y tampoco ha sido publicado en sitio alguno. Soy consciente de que el hecho de no respetar los derechos de autor y cometer plagio es objeto de sanciones legales, por lo que asumo cualquier responsabilidad que pudiera derivarse de irregularidades en el presente documento, así como de los derechos sobre la obra presentada. Asimismo, me hago responsable ante el Instituto Tecnológico de Chetumal o terceros de cualquier irregularidad o daño que pudiera ocasionar por el incumplimiento de lo declarado. De identificarse falsificación, plagio, fraude, o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, responsabilizándome por todas las cargas pecuniarias o legales que se deriven de ello y sometiéndome a las normas vigentes del Instituto Tecnológico de Chetumal y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

ATENTAMENTE



Ing. Javier Rodrigo Nahuat Sansores

Chetumal, Quintana Roo, a 08 de agosto de 2021.

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en este documento titulado “ESTUDIO DE LA CARBONATACIÓN DEL CONCRETO CON AGREGADO RECICLADO MODIFICADO CON ADICIÓN DE BACTERIA SPOROSARCINA PASTEURII” proviene de las actividades de investigación durante el periodo que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis dentro del programa de MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN en el Instituto Tecnológico de Chetumal del Tecnológico Nacional de México y que dicha información le pertenece en términos de la Ley de Propiedad Industrial, por lo que no me reservo ningún derecho sobre ello.

ATENTAMENTE



Ing. Javier Rodrigo Nahuat Sansores

Chetumal, Quintana Roo, a 08 de agosto de 2021.

Dedicatoria

A mi familia entera, padres, hermano y tías, quienes representan una fuente inagotable de cariño, paciencia y motivación, además de brindarme todo el apoyo, oportunidades y consejos siempre que lo necesité. Les agradezco por acompañarme en esta etapa, por dar lo mejor de sí todos los días, por enseñarme que el esfuerzo y disciplina pueden lograr grandes cosas.

A mi compañera de vida, Nayro, con todo mi amor y cariño, quien me ha acompañado en toda mi trayectoria académica a la fecha, por siempre creer en mí, por su cariño, comprensión y paciencia.

Por los académicos que conforman la plantilla del Tecnológico, quienes me han formado en la licenciatura y durante el posgrado, en especial al Dr. Jiménez Torrez, por su guía, su tiempo y dedicación, por confiar en mi potencial.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Tecnológico Nacional de México (Sede Chetumal) por su enorme apoyo durante la realización de este proyecto.

A todas las personas que de un modo u otro han ocasionado un impacto en mi vida.

Es gracias a todos ustedes que me permito alcanzar una meta más en mi vida, es por el esfuerzo conjunto que he llegado a este momento.

Resumen

En esta investigación se analizaron los resultados obtenidos en probetas ensayadas expuestas a carbonatación natural en intemperie durante dos años, a través de pruebas de indicador colorimétrico ácido-base con solución de fenolftaleína al 1% para determinar el avance del frente de carbonatación con el fin de obtener el coeficiente de carbonatación (k) y estimar el tiempo de servicio de las familias de concreto compuestas por mezclas de 0.5 y 0.7 relación agua/cemento (a/c) de concreto normal (CN, 100% Agregado Natural) o con agregado reciclado (CAR, 100% Agregado Reciclado), con adición de bacteria *Sporosarcina pasteurii*, por método directo, del 0.5% y 1.0% con respecto al peso del cemento. El concreto tratado con bacteria mostró un incremento aproximado de 32% en resistencia a la carbonatación, además de reducir su porosidad, absorción capilar y aumentar su tiempo estimado de servicio (incrementos de 2 hasta 50 años de servicio). Este efecto es notorio especialmente para los especímenes con mayor concentración de bacteria (1.0%), sugiriendo una actividad bacteriana que deriva en una redensificación de la matriz del concreto. Es así que la adición de bacterias al concreto se postula como una alternativa ambientalmente responsable que mejora de manera parcial los concretos con agregados reciclados y su alta absorción.

Abstract

This investigation analyzes the results achieved by concrete specimens exposed to natural environment during a period of two years which underwent phenolphthalein indicator tests (a 1% solution) to provide insight as to determine the advance of the carbonation front, the carbonation coefficient (k) and estimate the service time of the concrete specimens (0.5 & 0.7 w/c ratio) with natural aggregates (CN, 100%) and with recycled aggregates (CAR, 100%). The direct method was used to add the bacteria *Sporosarcina pasteurii*, in proportions of 0.5% and 1.0% with respect to cement weight. The bacteria-treated concrete showed an approximately 32% increase in carbonation resistance, as well as a reduction in its porosity, capillary absorption and an increase in its estimated time of service (in the order of 2 to 50

years). This effect is especially notorious in specimens with the most concentration of bacteria (1.0%), which suggests bacterial activity resulting in a densification of the concrete matrix. In accordance with these results, bacteria treatment is postulated as an environmentally responsible alternative which partially improves concrete with recycled aggregates with high absorption.

Contenido

1. Introducción	9
2. Planteamiento del problema	11
2.1. Antecedentes	14
2.2. Preguntas de investigación	20
2.3. Hipótesis	20
2.4. Objetivo general	20
2.5. Objetivos particulares	20
2.6. Alcances y limitaciones	21
2.7. Justificación.....	21
2.8. Glosario de términos	23
3. Estado del arte	26
3.1. Agregados reciclados.....	26
3.2. Durabilidad de los concretos, con enfoque hacia la carbonatación.....	30
3.3. Concreto bacteriano y el fenómeno de autocurado	35
3.4. Conclusión del estado del arte	41
4. Metodología.....	43
4.1. Materiales.....	43
4.2. Desarrollo Experimental	44
4.3. Unidades de Muestreo	46
4.4. Descripción de los procedimientos	47
4.5. Secuencia de ejecución.....	48
5. Resultados	51
5.1. Ajuste del frente de carbonatación	53
5.2. Coeficientes de carbonatación natural.....	54
5.3. Coeficiente de carbonatación, porosidad y sorptividad	55
5.4. Modelación del tiempo de servicio.....	57
6. Discusión.....	59
6.1. Análisis de los resultados	60
6.2. Viabilidad económica de la inclusión de bacterias al concreto.....	62
6.3. Dificultades de la inoculación de bacterias al concreto	64
6.4. Dirección para futuras investigaciones	67

7. Conclusiones.....	68
8. Referencias	72

Índice de figuras

Figura 1. Puente El Zacatal, que conecta la Cd. del Carmen con el resto del continente. Acero expuesto, propenso a corrosión por penetración de cloruros... 15	15
Figura 2. Acero expuesto en el puente La Unidad, que conecta Cd. del Carmen con la Península	16
Figura 3. Proceso de la biodeposición de calcita (CaCO_3) al llenar los poros en el concreto.....	36
Figura 4 Relación estadística de la aplicación de bacteria en material cementante.....	37
Figura 5. Efectos de la resistencia mecánica en concretos de estudio modificados con distintas bacterias.....	37
Figura 6. Varios tipos de bacterias con la concentración óptima para obtener la máxima resistencia a la compresión	38
Figura 7. Respuesta ante migración de iones cloruro de concretos de estudio modificados con distintas bacterias.....	40
Figura 8. Desarrollo experimental que describe las etapas de la presente investigación	44
Figura 9. Exposición natural de los especímenes.	49
Figura 10. Avance del frente de carbonatación de las familias 0.7 CN, 0.7 CAR, 0.5 CN y 0.5 CAR con 0.5% de adición de bacteria.	51
Figura 11. Probetas ensayadas a través de la prueba ácido-base con solución de fenolftaleína al 1%.....	52
Figura 12. Gráfica de barras en los que se presenta el coeficiente de carbonatación (k) por cada concreto de estudio y el límite establecido por la Red Durar	55
Figura 13. Gráfica triple eje en donde se presenta el comportamiento del coeficiente de carbonatación (k) junto a la porosidad y la sorptividad	56

1. Introducción

La carbonatación es un fenómeno químico natural, aparentemente inocuo que avanza lenta y progresivamente hacia el interior del concreto, disminuyendo la alcalinidad y dañando la capa de pasividad que recubre el refuerzo.

El proceso reduce el tiempo de servicio de los elementos. Las características que más inciden en la velocidad del avance de la carbonatación son: la humedad relativa, concentración de CO₂, la cantidad de cemento que se utilizó en la mezcla, humedad y porosidad (Jiménez & Moreno, 2015)

El avance de la carbonatación, en las superficies del espécimen de ensayo, se determina aplicando fenolftaleína (al 1%) para determinar si el pH ha disminuido por debajo de 8, pues en valores mayores la coloración es de color rojo púrpura (RILEM, 1988; Tam et al., 2021).

La literatura sugiere que, aunque la carbonatación es un proceso altamente repetitivo su reproducibilidad es sumamente baja, debido a su complejidad temporal. Por ello, en los casos donde no se dispone del tiempo necesario para una carbonatación natural, algunos autores han empleado las cámaras de carbonatación acelerada (Campos-Silva, A.R.; Fajardo, G.; Mendoza-Rangel, 2016; Jiménez & Moreno, 2015; Leemann & Loser, 2019; Li et al., 2019; Sanjuán et al., 2003; Ulloa et al., 2010).

Desde hace medio siglo, los concretos bacterianos han sido interés de la comunidad científica por sus resultados positivos en cuanto a las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Sin embargo, siguiendo lo expuesto en la literatura, las pruebas de durabilidad en concretos bacterianos son un tema de alto valor para el avance de la ciencia.

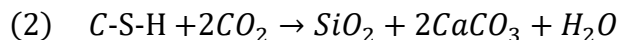
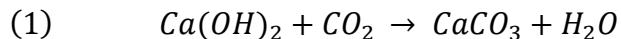
El presente trabajo se desarrolla partiendo del interés por estudiar la durabilidad de concretos adicionados con bacteria *Sporosarcina pasteurii* y con sustitución del 100% de agregados reciclados, sometiendo especímenes elaborados con esta combinación a pruebas de avance del frente de carbonatación después de un periodo de exposición a la carbonatación natural.

Estas pruebas aportan información valiosa concerniente al comportamiento microestructural del concreto, además permiten modelar la vida de servicio (en términos de durabilidad) del concreto con agregado reciclado modificado con adición de bacteria *Sporosarcina pasteurii*.

2. Planteamiento del problema

Dado que el concreto reforzado es el material más utilizado para el desarrollo infraestructural, la preocupación prevaleciente es con respecto a su durabilidad. Máxime cuando el esperado tiempo de servicio normalmente supera los cien años. El principal problema del concreto reforzado es la corrosión del acero de refuerzo. En un escenario ideal, el acero se encontraría siempre protegido por una película alcalina (pH mayor a 12.5) protectora debido a la alcalinidad del concreto, sin embargo, esta película puede destruirse por los efectos de la carbonatación o por el ingreso de iones cloruro (Moreno, 2013).

La carbonatación es un fenómeno que puede ocasionar corrosión en las estructuras de concreto reforzado, indirectamente, al reducir el pH en la solución de los poros del elemento. La literatura especializada ratifica que la reducción de pH en la solución de los poros compromete la integridad del concreto reforzado al permitir un incremento en la concentración de iones cloruro en dicha solución (Ghahari et al., 2016). Las reacciones que se desarrollan en la microestructura del concreto son las siguientes:



De acuerdo con (Moreno, 2006), la carbonatación es una consecuencia de la reacción de los productos del cemento hidratado (como son el hidróxido de calcio y el gel C-S-H) con el dióxido de carbono presente en el ambiente, lo que a su vez produce calcita y agua. Al consumirse el anión hidróxido $(OH)^-$ y producirse calcita ($CaCO_3$) el potencial hidrógeno de la solución disminuye al igual que la porosidad del concreto.

El fenómeno descrito anteriormente, toma notable relevancia al considerar concretos con sustituciones (estrategia para reducir el impacto ambiental producto de la industria de la construcción), especialmente los que utilizan sustitución con agregado reciclado (AR) por las desfavorables propiedades físicas que lo

diferencian de su contraparte natural. Dichas propiedades físicas de los AR reducen la vida útil de los concretos con agregado reciclado (CAR).

La extensa literatura en AR demuestra que los agregados obtenidos a partir del reciclaje presentan ciertas desventajas en cuestión de durabilidad con respecto a su contraparte natural, entre ellas el tener una mayor porosidad y una menor dureza lo cual disminuye su durabilidad, factores que contribuyen a reducir su resistencia a la carbonatación, lo que a su vez deriva en una demolición prematura y consecuentemente, una acumulación de residuos sólidos.

Como se mencionó antes, una estrategia aceptada globalmente es el reúso de residuos de construcción y demolición (RCD), obteniendo el agregado reciclado (AR) utilizado en concretos con agregados reciclados (CAR). A pesar de los esfuerzos a nivel mundial para implementar esta alternativa, una de los impedimentos más notables en cuanto a su aplicación reside en la durabilidad de estos CAR por la naturaleza de los agregados reciclados (AR) (Hansen, 1986).

La problemática central está relacionada con una serie de efectos concatenados, pues al intentar reducir la depredación de materiales vírgenes (así como la reducción del cemento en las mezclas) se ha optado por la sustitución de materiales reciclados en las mezclas, sin embargo, dicha sustitución no presenta el mismo rendimiento que su contraparte natural; es por ello que surge el interés por mejorar las propiedades de los concretos con dichas sustituciones.

Otra situación que cabe resaltar es en materia de residuos sólidos, donde el Programa de Desarrollo Urbano aplicable al municipio de Othón P. Blanco, señala la carencia de adecuados sistemas de relleno sanitario para la disposición de residuos sólidos y basura (SEDATU, 2018).

Es en estos sitios donde son finalmente depositados los desechos de demolición de las construcciones. Aunado a esto, en el apartado II.1.6.4 denominado "Ordenamiento Ecológico", se reconoce la necesidad de regenerar los geoeosistemas. Básicamente hace referencia a los sitios que en su condición física

o biótica han sido afectados negativamente por la sobreexplotación de sus recursos, tales como son los sitios de extracción de pétreos a cielo abierto.

Para hacer frente a estas problemáticas, se han propuesto numerosas iniciativas a nivel local para abaratar los costos de construcción y por ende, el consumo de material virgen para la elaboración o rehabilitación de elementos fabricados a través de la sustitución de residuos de construcción y demolición (RCD), contribuyendo en gran medida a la preservación del medio ambiente (Domínguez & Martínez, 2007; Jimenez & Domínguez, 2008; Jiménez & Moreno, 2015). El fin de estas investigaciones es también brindar una opción de consumo circular, en el que se puedan insertar los RCD.

Las problemáticas anteriores se traducen en una incipiente necesidad de estudiar los AR bajo diferentes enfoques, uno muy importante es el de durabilidad, como se ha mencionado antes. La sustitución de AR en concretos ha sido estudiada en materia de durabilidad en el pasado por (Jimenez & Domínguez, 2008; Kisku et al., 2017)

La literatura sugiere la posibilidad de subsanar las propiedades de los AR como agregados en concretos con adiciones que mejoren una o más de sus características. Tal es el caso de una introducción novedosa al campo de la construcción: concretos bacterianos o bioconcretos.

Esta es una alternativa que intenta conciliar dos disciplinas diferentes, la microbiología y la ingeniería civil. Consiste en introducir cepas bacterianas activadas al concreto con miras hacia la autorreparación por medio de la precipitación de cristales de carbonato de calcio para el relleno y sellado de microfisuras en el concreto por la calcita bioprecipitada.

2.1. Antecedentes

Desde finales del siglo pasado ha sido de interés para la comunidad científica analizar la durabilidad de las estructuras de concreto ante la corrosión de los elementos de refuerzo. Hasta el día de hoy, dos principales mecanismos han sido identificados: la corrosión por penetración de cloruros y la corrosión por carbonatación (K. Li et al., 2019).

En un concreto sin acero de refuerzo se podría suponer los efectos de la carbonatación como inconsecuentes, sin embargo, a altos niveles de CO₂ la carbonatación afecta la porosidad del elemento disminuyendo su tiempo de servicio.

En situaciones específicas puede presentarse la acción combinada de ambos, por ejemplo: cuando el spray marino tiene contacto con las estructuras de concreto que a su vez están expuestas a los efectos del CO₂. Existe literatura en este aspecto a nivel internacional, nacional y local (Jiménez & Moreno, 2015; Li et al., 2019; Sanjuán et al., 2003).

Normalmente los costos de mantenimiento y reparación de infraestructura son eclipsados por el impacto, en los costos totales, de los costos de construcción. Sin embargo, tan solo en los Estados Unidos al Gobierno le costó \$20.1 billones (en inglés) de dólares los costos relacionados a la reparación por daños provocados por la corrosión, sin incluir los \$22.6 billones (en inglés) relacionados a la corrosión de infraestructura ya en el año 2001 (Koch et al., 2002).

De manera global se estima que por lo menos el 3% del PIB (un equivalente a \$2.2 trillones de dólares) es invertido en costos de rehabilitación y reparación relacionados con la corrosión de infraestructura (Hays, 2010).

También existen casos de relevancia a nivel nacional, la Figura 1 corresponde a una fotografía tomada del puente El Zacatal, donde por los efectos del intemperismo y deficiencias constructivas se puede apreciar acero expuesto. Es menester mencionar el efecto de carbonatación como precursor de la penetración de cloruros en estos casos, donde su acción conjunta vulnera la integridad de las estructuras (Herrera-Borja, 2006).



Figura 1. Puente El Zacatal, que conecta la Cd. del Carmen con el resto del continente. Acero expuesto, propenso a corrosión por penetración de cloruros. Juan Herrera Borja (2006).

Esto no se trata de un caso único o excepcional, por supuesto, el antiguo puente La Unidad, el cual es la continuidad del puente El Zacatal pero que conecta con la península, también ha reportado severos daños por intemperismo (Figura 2). A través de reportes de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y el titular de la Secretaría de Desarrollo Urbano, se estimó que en un corto periodo de tiempo su estado no garantizaría la seguridad de quienes lo transiten y, por tanto, optaron por centrar sus esfuerzos en el nuevo viaducto “Nuevo puente La Unidad” (Menéndez Rodríguez, 2019).



Figura 2. Acero expuesto en el puente La Unidad, que conecta Cd. del Carmen con la Península. Autor desconocido (2019)

Una de las razones por las que no es viable reparar el antiguo puente se deben a que las obras de reparación tomarían meses en llevarse a cabo, además de ser costosas pues una gran cantidad de ellas contemplaría el completo reemplazo del elemento. Es así, que las obras de reparación, juegan un papel de suma importancia en este tipo de estructuras.

Por supuesto, las obras de reparación son también observadas desde un enfoque de sustentabilidad, pues existe una cantidad de material utilizado en estas obras de reparación, por su producción, su transporte y por el desecho de los residuos que se generen (Kisku et al., 2017).

La siempre creciente urbanización y la rápida industrialización han dado lugar a un igualmente acelerado consumo de los recursos disponibles. Esta tendencia se ha incrementado indiscutiblemente desde hace poco más de 100 años, es por ello que en la cumbre de Rio de Janeiro de 1992 se presentó por primera vez el concepto de “desarrollo sustentable” (UNCED, 1993).

La industria de la construcción ha experimentado una expansión masiva en el último siglo. Este crecimiento ha colocado al sector de la construcción como segundo lugar en emisiones de dióxido de carbono. De acuerdo con (Peng, 2016), los edificios son causantes de alrededor del 33% de las emisiones de dióxido de carbono globales y tienen un consumo de cerca del 40% del consumo energético alrededor del mundo, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. De acuerdo con datos de (World Bank, 2014) en México, la industria de la construcción contribuye con un 13.4% de las quemadas de combustibles fósiles totales.

El material compuesto más utilizado en la industria de la construcción es el concreto, dada su versatilidad y la facilidad con la que se pueden modificar sus propiedades. Se compone normalmente de cemento, polvo, agregado grueso y agua. De estos componentes dos son manufacturados masiva e intensamente (en materia de consumo energético): el cemento y los agregados.

A partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, en adelante) correspondientes al año 2011, México se mantuvo como el lugar 13 en producción de cemento a nivel mundial, con una producción anual de 36.3 millones de toneladas (INEGI, 2013), como se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

También, de acuerdo con datos obtenidos de la Cámara Nacional del Cemento (CANACEM, en adelante) y el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) en México, durante el periodo comprendido de los meses enero-agosto del año 2019 la producción de cemento se estimó de aproximadamente 27 millones de toneladas, con un consumo de cemento de aproximadamente 325 kg por habitante por año (CANACEM; INEGI, 2019).

Tabla 1. Relación mundial de los países productores de cemento. INEGI (2013)

Países productores de cemento

Países	2010	2011 ^{ef}	2010	2011 ^{ef}
	Millones de toneladas		Porcentajes	
Total Mundial^{ef}	3 310.0	3 400.0	100.0	100.0
1 China	1 880.0	2 000.0	56.8	58.8
2 India	210.0	210.0	6.3	6.2
3 Estados Unidos de Norteamérica ^{af}	67.2	68.4	2.0	2.0
4 Turquía	62.7	64.0	1.9	1.9
5 Brasil	59.1	62.6	1.8	1.8
6 Irán	50.0	52.0	1.5	1.5
7 Rusia	50.4	52.0	1.5	1.5
8 Vietnam	50.0	50.0	1.5	1.5
9 Japón	51.5	47.0	1.6	1.4
10 República de Corea	47.2	46.0	1.4	1.4
11 Egipto	48.0	45.0	1.5	1.3
12 Arabia Saudita	42.3	44.0	1.3	1.3
13 México	35.9	36.3	1.1	1.1
14 Tailandia	36.5	36.0	1.1	1.1
15 Italia	36.3	35.0	1.1	1.0
16 Alemania	29.9	33.0	0.9	1.0
17 Pakistán	30.0	30.0	0.9	0.9
18 Indonesia	22.0	22.0	0.7	0.6
19 España	23.5	20.7	0.7	0.6
20 Resto de países	477.5	446.0	14.4	13.1

Por su parte, la producción de agregados pétreos en México se encuentra distribuida ampliamente, resaltando su cercanía con los centros de desarrollo urbano y ampliación de carreteras, lo cual resulta sumamente lógico dada su finalidad. En la gran mayoría de los casos, la extracción de agregados pétreos se realiza mediante el uso de sustancias o equipos de fragmentación (SE, 2013).

A nivel local, se presenta una sobreexplotación de los geosistemas en los sitios de extracción de pétreos a cielo abierto y requieren de acciones de regeneración, tal como menciona el Programa de Desarrollo Urbano (PDU, en adelante) (SEDATU, 2018).

Esta situación es conocida tanto a nivel nacional como mundial, ya que su tasa de explotación ha ido en aumento en los últimos años, provocando daños al entorno, como son: reducción de la biodiversidad, pérdida de terreno fértil (erosión),

perturbación de las funciones hidrológicas, afectaciones a las fuentes de abastecimiento de agua y daño ambiental por el transporte de los materiales obtenidos y por los medios de obtención (United Nations Environment Program (UNEP), 2014).

El impacto que tiene la industria de la construcción se encuentra ligado principalmente a su régimen de consumo lineal. El régimen de consumo lineal (Arroyo Morocho, 2018) en el sector constructivo, en pocas palabras, hace referencia al proceso de excavación/obtención de la materia prima a partir de la cual se producen los subsiguientes elementos constructivos, que se utilizan, se demuelen y se depositan en vertederos.

Datos de la Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (CMIC, en adelante), indican una Generación Anual Estimada de 6 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición en el año de referencia 2011, con un estimado para 2018 de 9.9 millones de toneladas, aproximadamente unas 27,000 toneladas al día (CMIC; Romero Pérez, 2005). Por supuesto, estas cifras representan un estimado que no refleja las contribuciones por desastres naturales.

A este respecto, se han sumado esfuerzos para disminuir dichos impactos ambientales (siguiendo el enfoque de “desarrollo sustentable”), a través de investigaciones que proponen la sustitución de materiales vírgenes por materiales de reúso o por la adición de materiales, sustancias, nano-compuestos o bacterias que reduzcan la cantidad de otro material que es explotado para su primer uso (De Belie, 2016; Meyer, 2009; Sanchez & Sobolev, 2010).

A pesar de que la sustitución de agregados reciclados es una práctica común para disminuir el impacto ambiental de la industria de la construcción, estos presentan desventajas en materia de durabilidad, ya que al ser más porosos su consecuencia es una mayor carbonatación.

2.2. Preguntas de investigación

De lo expuesto anteriormente, se desprenden las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Cuál es la resistencia a la carbonatación de los concretos de estudio?
- ¿Cómo influye la bioprecipitación en las propiedades físicas de los concretos de estudio?

2.3. Hipótesis

“La adición de bacteria *Sporosarcina pasteurii* en concretos con agregado reciclado promueve la precipitación de cristales de calcita (CaCO_3) en los poros y microfisuras del elemento, mejorando su resistencia a la carbonatación”.

2.4. Objetivo general

Como objetivo principal de esta investigación se tiene:

- Estudiar el comportamiento de especímenes de concreto con agregado reciclado y adición de bacteria *Sporosarcina pasteurii*, ante los efectos de la carbonatación.

2.5. Objetivos particulares

- Exponer a condiciones ambientales naturales a los concretos de estudio.
- Determinar la resistencia a la carbonatación de los concretos de estudio.
- Modelar la vida de servicio del concreto, en términos de durabilidad.

2.6. Alcances y limitaciones

En términos de durabilidad en concretos, los dos fenómenos que más afectan a los elementos son: ataque por cloruros y la carbonatación, ambos precursores de los problemas de corrosión.

La presente investigación se enfoca en el concreto simple y el fenómeno de la carbonatación, es decir, se fija como alcance conocer la respuesta del concreto ante los efectos de la carbonatación.

En cuanto a la limitación, no se instrumentarán probetas de concreto reforzado, no se estudiará el ataque por cloruros ni la corrosión *per se*, tampoco se implementarán estudios de carbonatación acelerada, por cuestión de tiempo y la magnitud de dichos estudios.

En términos del equipo necesario para el análisis de los concretos de estudio, se cuenta con el material y equipo necesarios en el TECNM Campus Chetumal.

2.7. Justificación

En reciprocidad a lo expuesto, se establecen a continuación las razones que sugieren la justificación de la presente investigación.

En atención a la demanda global de *soluciones sostenibles*, además de la problemática a nivel local, surge la necesidad de proporcionar insumos experimentales que validen la auto reparación mediante el relleno y sellado de fisuras en concreto rígido y que además utilicen agregados reciclados, apoyando el concepto de régimen circular de consumo y promoviendo una regeneración de los geo-ecosistemas dañados por la sobreexplotación de agregados pétreos a cielo abierto. Un tema a tener en cuenta ante una posible actualización del Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y Demolición (CMIC; Romero Pérez, 2005).

En el *ámbito tecnológico y de bienestar social*, el presente, se perfila como un punto de referencia para futuras investigaciones y aplicaciones destinadas al mejoramiento en las propiedades de durabilidad del concreto rígido, una perspectiva

con la que abaratar los precios de construcción y disminuir presión en los rellenos sanitarios (destino final de los desechos de la construcción) (SEDATU, 2018).

En el *apartado económico*, se presenta una alternativa para la reducción del cemento pues la bacteria *S. pasteurii* como aditivo aumenta las propiedades del concreto. Además, basado en una revisión extensa de la literatura, se sugiere que el aporte de la calcita precipitada a la durabilidad justifica el costo de su aplicación directa durante el mezclado disminuyendo los costos asociados a obras de reparación, mantenimiento o rehabilitación, al aumentar la vida útil del concreto (Mondal & (Dey) Ghosh, 2018).

2.8. Glosario de términos

- **Agregado natural (AN):** Agregados producidos en canteras, por métodos de explosión y trituración.
- **Agregado reciclado (AR):** Agregados producto del reciclado/reúso de residuos de construcción y demolición (RCD).
- **Bioprecipitación (o precipitación bacteriana):** Fenómeno provocado por bacterias a través de la hidrólisis de la urea produciendo suficiente enzima ureasa para bioprecipitar carbonato de calcio (CaCO_3).
- **Cámara de carbonatación acelerada:** Sistema artificial controlado que permite estudiar en un corto periodo de tiempo el fenómeno de la carbonatación acelerada y sus efectos en estructuras de concreto.
- **Capa pasiva:** Película, de unas decenas de angstroms, de óxidos, oxígeno adsorbido o muchas veces, de naturaleza desconocida, que al formarse sobre el acero reducen la velocidad de corrosión.
- **Carbonatación:** Disminución del pH producido por la reacción de los componentes ácidos del medio (en la atmósfera, dióxido de azufre y dióxido de carbono, principalmente) con la fase líquida intersticial del concreto.
- **Coeficiente de carbonatación (k):** Coeficiente en función del medio de exposición, de la porosidad del concreto, del tipo de cementantes en la mezcla y de la resistencia media del concreto a la compresión, comúnmente expresado en $\text{mm/año}^{0.5}$.
- **Concreto con agregado natural (CN):** Concreto elaborado enteramente con agregados naturales.

- **Concreto con agregado reciclado (CAR):** Concreto elaborado con agregados reciclados como sustitución total o parcial del agregado natural.
- **Corrosión:** Oxidación destructiva de un metal/aleación por el medio que lo rodea.
- **Despasivación:** Proceso en el que la película protectora del acero es removida cuando el concreto pierde alcalinidad, un efecto que puede ser resultado de la carbonatación o de la presencia de iones cloruro en la superficie de dicho concreto.
- **Dióxido de carbono (CO₂):** Gas incoloro, inodoro e incombustible que se encuentra en relativamente baja concentración (alrededor de 0.03% y 0.05% en volumen) en el aire que respiramos. Se genera cuando se quema cualquier sustancia que contenga carbono.
- **Durabilidad:** Término que hace referencia a la vida de servicio (en condiciones óptimas) de una estructura, o en su defecto, de su vida remanente. Capacidad de las estructuras de concreto de conservar inalteradas sus condiciones químicas y físicas durante su vida útil.
- **Grietas (o fisuras):** Hendidura, raja o abertura que se forma en el concreto.
- **Humedad relativa (HR):** La relación, expresada como porcentaje, entre la cantidad vapor de agua presente en la atmósfera a una temperatura dada y la cantidad requerida para la saturación a la temperatura indicada.
- **Indicador colorimétrico:** Sustancia química que se adiciona a un medio para indicar, por medio de un cambio de color, si se ha alcanzado un nivel específico de pH. Utilizado comúnmente para determinar la carbonatación en el concreto.

- **Ión cloruro (Cl⁻):** Es uno de los aniones inorgánicos principales en el agua natural y residual.
- **Mortero adherido:** Mortero adherido al agregado reciclado después del proceso de trituración para su reuso.
- **Penetración de cloruros:** Proceso nocivo para el concreto, iniciado por la acción de los cloruros ingresando por los poros y microfisuras del mismo, derivando en una acumulación de producción de corrosión sobre el acero, con la consecuente ruptura del concreto que lo rodea.
- **Porosidad:** Cociente entre el volumen de los poros y el volumen aparente del hormigón. Porcentaje de agujeros formados por canales visibles e invisibles en el concreto.
- **Productos del cemento hidratado:** Productos del proceso de hidratación del cemento, en el cual reacciona al mezclarse con el agua, generando enlaces o estructuras cristalinas, que le atribuyen sus propiedades como material aglutinante. Cuando disminuye la presencia de silicatos aumenta la de iones Ca, formando núcles de CH y gel C-S-H.
- **Vida útil de servicio:** Periodo comprendido desde la ejecución de la estructura hasta que se alcanza un nivel inaceptable de deterioro.
- **Zona de transición interfacial (ITZ, por sus siglas en inglés):** Zona más importante en la microestructura de la pasta de cemento en el concreto, es la región próxima a la superficie de contacto con los agregados. La influencia de esta zona en el comportamiento del concreto es considerable, es aquí donde suceden las reacciones alcalí-agregado e hidróxido de calcio-agregado.

3. Estado del arte

3.1. Agregados reciclados

La industria de la construcción es el sector con mayor impacto ambiental debido a que consume grandes cantidades de energía y de materiales para su uso directo o indirecto como son el cemento, acero, madera, cerámicos, plásticos, entre otros. Otro de sus más grandes impactos es la generación de residuos, tanto de construcción como de demolición. Uno de los esfuerzos de investigación en el área de la construcción es el reciclado/reúso de residuos de construcción y demolición (RCD), que es un importante paso hacia el desarrollo sustentable.

Durante la primera guerra mundial las grandes ciudades europeas como Berlín o Londres comenzaron a ser objetivos de interés para ciertas tácticas militares, es así que, durante la segunda guerra mundial, y con el avance de la industria, era particularmente sencillo interrumpir la forma de vida civilizada a ciudades con ataques a distancia, debilitando a la nación adversaria (Graham, 2004).

En el caso específico de la ciudad de Berlín, el bombardeo aéreo por parte de los aliados fue menoscabando los centros históricos y los edificios que resultaron dañados durante el avance de las fuerzas terrestres. El escombros producto de demolición fue caracterizado para rescatar materiales que pudieran ser reutilizados durante la reconstrucción de la metrópoli. Los principales beneficios que aportaba esta recolección de escombros eran la rápida disponibilidad de materia prima para construcción de refugios y la reducción de volúmenes en las vías principales de la ciudad (lo que entorpecía los procesos de rescate, distribución de servicios básicos y alimentos).

La selección de escombros que pudieron ser rescatados se utilizaban como agregados en concretos de baja calidad o directamente como agregados en caminos y relleno de block hueco. Entre otros materiales, las piezas de piedra de gran tamaño, los morteros de limo, la arcilla y la madera, se recomendaban no utilizarse directamente para nuevas mezclas de concreto, tanto por temor a disminuir la calidad de la mezcla como por los efectos adversos de los sulfatos

solubles o la contaminación orgánica de la misma. La ciudad de Berlín sufrió daños severos en su infraestructura post-guerra, pero a través de un cuidadoso plan de distribución de recursos pudo anteponerse a la situación (Al-Qaraghuli et al., 2017).

Desde entonces, ha sido un enfoque de la investigación en la industria de la construcción el reciclaje/reúso de los RCD, obteniendo agregados reciclados (AR) principalmente de elementos de concreto. Por supuesto, el reciclaje del concreto no es un fin por sí mismo, la idea principal es reducir el impacto ambiental de la manufactura de cemento y de la explotación de recursos naturales para obtener agregados vírgenes o naturales (AN).

El concreto simple consta de tres componentes principales: la pasta de cemento endurecido, los agregados y la zona de transición interfacial (ITZ, por sus siglas en inglés). De los tres, el último representa la zona más propensa a falla, debido a las fisuras que naturalmente se presentan y a la alta porosidad de esta zona.

Los problemas técnicos de incorporar AR a mezclas de concreto de diseño son bien conocidos y han sido objeto de investigación desde hace ya varios años (ACI Committee 555, 2001; Hansen, 1986; Luis F. Jiménez et al., 2018; Kisku et al., 2017; Ravindrarajah RS, 1985): por lo general, poseen una menor densidad, esto debido al mortero adherido al agregado y su respectiva ITZ (la cual presenta una alta porosidad).

Esta menor densidad es la razón principal de que los concretos con agregado reciclado (CAR) absorban más agua en relación a su contraparte natural (CN), pues la presencia de los AR con una ITZ previa (formada entre el mortero y los AN) se suma a la nueva ITZ (formada entre el mortero adherido a los AR y la nueva matriz cementante) provocando comportamientos físico-mecánicos indeseados en el CAR (menor resistencia a la compresión y tensión, mayor absorción, mayor permeabilidad), derivado de lo anterior surgen inquietudes con respecto a su durabilidad (menor resistencia a la carbonatación, mayor penetración de cloruros).

De acuerdo con Hansen (1986), en los AR las tasas de absorción son aproximadamente 2.3 - 4.6 mayores que en los AN. Por su parte Nixon (1978)

observó que la resistencia a la compresión de los CAR son un 20% menores a los del CN. La literatura señala que es imperativo conocer el procedimiento por el que se obtuvieron los AR, es decir, el método de trituración. Entre los métodos de trituración de residuos de la construcción, el autor señala los tres más comunes: Mandíbulas, trituradora horizontal y molino triturador. De la elección del método depende la cantidad de finos presentes y a mayor cantidad de finos mayor cantidad de residuos de mortero adheridos al AR.

La literatura sugiere que existen básicamente seis mecanismos para mejorar las propiedades del CAR: la remoción del mortero adherido al AR y el fortalecimiento de dicho mortero a través de recubrimientos, denominados 'coating' (Kisku et al., 2017; Shi et al., 2016), así como el mezclado en fases, adición de minerales, carbonatación y auto-curado a través de bacterias (Tam et al., 2021; Wang et al., 2017).

Para el primer caso, la remoción del mortero, autores como Bai et al., (2020) y Kisku et al., (2017) sugieren una alternativa económica, fácil de implementar y con excelentes resultados experimentales: Mezclado en Dos Fases (TSMA, por sus siglas en inglés). Durante la primera etapa se añade la mitad del agua al AR y se mezcla durante 60 segundos, para que en la segunda fase se le agregue el cemento (se mezcla por 30 segundos) y finalmente se vierte la otra mitad del agua (mezclado durante 120 segundos). La premisa general, es que el sangrado del mortero adherido a los AR que ocurre durante la primera fase penetra las micro-fisuras y vacíos de dicho mortero, dejando la otra parte del agua para completar el diseño de la mezcla. Como mecanismos de fortalecimiento se hace mención del humo de sílica y polvo puzolánico.

Por otro lado, Shi et al. (2016) sugieren otros métodos como molienda mecánica, molienda a altas temperaturas, pre-lavado en agua y pre-lavado en ácido. Del mismo modo, se exploraron alternativas como emulsión de polímeros, recubrimiento con puzolanas, bioprecipitación de carbonato de calcio (calcita) y carbonatación.

Los autores coinciden en que es menester profundizar en investigaciones que abarquen condiciones reales a largo plazo con elementos de CAR, con respecto a

sus propiedades mecánicas y de durabilidad. De igual manera, la investigación que exploró el mecanismo de fortalecimiento por carbonatación, determinó que no solamente es un método eficiente sino también ambientalmente amigable, demostró ser el tratamiento más asequible para mejorar las propiedades del CAR (Qiu et al., 2014).

Una alternativa que ha sido explorada ampliamente en la actualidad, es la bioprecipitación de calcita para el fortalecimiento de agregados, principalmente con la bacteria *Sporosarcina pasteurii* (Feng et al., 2020; Grabiec et al., 2012; Qiu et al., 2014). Los autores coinciden en que la bioprecipitación de calcita aumenta la calidad del AR al reducir la absorción, al igual que su resistencia a la compresión y flexión. Los resultados indican que el cultivo de bacteria para la mejora de las propiedades de AR es prometedor como alternativa, siempre que se pueda comprobar su costo-eficiencia. En este mismo sentido, Joshi et al. (2020) consideran prometedora la bioprecipitación de calcita para mejorar los concretos reciclados, los agregados reciclados directamente y en suma cualquier concreto con sustitución de cementantes por desechos.

En una investigación novedosa, Tam et al. (2021) han trabajado sobre la utilización de agregados reciclados y bacterias en el concreto, con un enfoque en el autocurado del mismo, consideran que es difícil que las bacterias sobrevivan en un ambiente con baja humedad o con una elevada alcalinidad, por lo que recomienda realizar más investigaciones en aspectos de la resistencia de las bacterias ante las condiciones del concreto, además indican que es menester realizar investigaciones con un enfoque en el método de inoculación para lograr determinar cuál es el mejor vehículo.

3.2. Durabilidad de los concretos, con enfoque hacia la carbonatación

En la industria de la construcción el concreto es el material compuesto más utilizado, dadas su durabilidad, adaptabilidad y la facilidad con que sus propiedades pueden ser modificadas. Gran parte de los usos que se le confieren al concreto son en edificios comerciales, residenciales y de infraestructura pública. Por la importancia y funcionamiento de dichas edificaciones es menester reforzar el concreto con acero en su parte interior (Parrott, 1990).

Al entrar en contacto con el concreto, en la superficie del acero se forma una capa pasiva (película alcalina) que protege a la varilla. Sin embargo, dicha película protectora puede ser removida si el concreto pierde alcalinidad, un efecto que puede ser resultado de la carbonatación o de la presencia de iones cloruro en la superficie de dicho concreto (Parrott, 1990). A dicho fenómeno se le conoce también como despasivación del acero de refuerzo.

La pérdida de la película protectora comienza un proceso de oxidación en la varilla de acero que puede expandirse a lo largo de toda la armadura. Este proceso es identificado normalmente por un fenómeno de desprendimiento del recubrimiento, ya que al aparecer sólidos al interior del concreto se producen también fuerzas internas causantes de grietas y, por ende, desprendimientos (Vidaud, 2012).

De acuerdo con Parrott (1990) los peligros por presencia de iones cloruro ya eran reconocidos y contemplados en el diseño desde esa década, con excepción de los riesgos latentes en autopistas, construcciones marítimas y costeras. Por lo que consideraba importante el estudio aislado de la carbonatación como fenómeno.

Autores como Ghahari et al. (2016), Malheiro et al. (2015), Mao et al. (2019), Ramezani-pour et al. (2014) y Yoon (2007), consideran pertinente realizar estudios de carbonatación en conjunción con penetración de cloruros o de ciclos de congelamiento y deshielo, al ser fenómenos que naturalmente se presentan, o pueden presentarse simultáneamente. En ocasiones, como sucede con la carbonatación y la penetración de cloruros, pueden inhibirse entre sí sus efectos (Ghahari et al., 2016) por lo cual su estudio aislado también es recomendado.

Por su parte, algunos autores como Farah et al. (2019) también consideran crucial el estudio de la carbonatación y sus efectos en el concreto, como una propuesta adelantada a su tiempo, con miras a un futuro no tan lejano. Lo anterior debido a las publicaciones recientes del *Intergovernmental panel on climate change (IPCC)*, donde a través de un análisis predicen un incremento significativo de la concentración de CO_2 en el aire para los próximos años (IPCC, 2018).

De acuerdo con Vidaud, (2012), el fenómeno físico-químico de la carbonatación consiste en la reacción entre el CO_2 y un hidróxido o un óxido formando un carbonato, esta reacción con los compuestos de calcio (productos de hidratación) tiene como resultado la producción de carbonatos de calcio (CaCO_3).

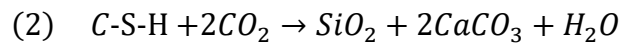
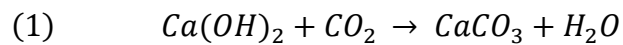
De acuerdo con (Moreno, 2006), la carbonatación es una consecuencia de la reacción de los productos del cemento hidratado (como son el hidróxido de calcio $[\text{OH}]$ y el gel *C-S-H*) con el dióxido de carbono presente en el ambiente, lo que a su vez produce carbonato de calcio (CaCO_3) y agua (H_2O). Al consumirse el anión hidróxido $(\text{OH})^-$ y producirse carbonato de calcio (CaCO_3) el potencial hidrógeno (pH) de la solución disminuye al igual que la porosidad del concreto.

La investigación de von Greve-Dierfeld et al. (2020), indica que el principal producto de la reacción de la carbonatación es el carbonato de calcio, que puede precipitar en tres formas cristalinas: calcita, aragonita y vaterita. El tipo de cristal que se presente dependerá en gran medida de las condiciones internas del concreto, tales como el pH, temperatura y saturación.

En condiciones ambientales normales, los cristales de CaCO_3 precipitados más comunes son la calcita y la vaterita, de ambos el más estable en condiciones ambientales es la calcita.

Durante el fenómeno de la carbonatación la portlandita es (en proporción) el producto de hidratación que más se descompone para producir carbonato de calcio, lo cual ocurre como consecuencia de una reacción de disolución-precipitación, la cual es más rápida que la carbonatación de C-S-H.

La literatura especializada ratifica que la reducción de pH en la solución de los poros compromete la integridad del concreto reforzado al permitir un incremento en la concentración de iones cloruro en dicha solución (Ghahari et al., 2016). Éstas son las reacciones que ocurren en la microestructura del concreto expuesto a carbonatación (Ecuación 1, Ecuación 2):



Por lo tanto, es claro que la penetración de cloruros y la carbonatación no son precisamente fenómenos desfavorables exclusivos entre sí, pueden ser combinados. También, su presencia no se debe únicamente al CO_2 , pues como se ha visto, también la humedad y la temperatura adecuados son factores de suma importancia para propiciar dicho fenómeno.

Además, se trata de un fenómeno progresivo que avanza desde la superficie hasta el interior del concreto provocando cambios en las propiedades físicas. A este proceso que precede a la despasivación del acero de refuerzo, se le conoce como *Avance del frente de carbonatación*.

De acuerdo a la literatura (RILEM, 1988; Tam et al., 2021), este avance comúnmente se cuantifica con la prueba de indicador colorimétrico con fenolftaleína al 1%, el cual permite identificar en las superficies si el pH ha disminuido por debajo de 8, pues en valores mayores la coloración es de color rojo púrpura, por lo que la periferia generalmente presenta un tono gris (natural del concreto) mientras hacia el centro del espécimen se pueden apreciar tonos rojos y púrpuras.

Existen otros métodos para medir el avance de la carbonatación, directa o indirectamente como son la porosimetría por intrusión de mercurio (MIP, por sus siglas en inglés) o por medio de un análisis termogravimétrico (TGA, por sus siglas en inglés) (Ghahari et al., 2016). Sin embargo, la literatura demuestra que el método más utilizado y aceptado es el de indicador colorimétrico, por su sencillez y fiabilidad (Moreno, 2010).

Para el estudio de los efectos de la carbonatación, que simulen un largo periodo de tiempo a exposición natural, han sido empleadas cámaras de carbonatación acelerada, con una concentración de CO₂ deseada para simular una cantidad de tiempo determinada y un control de la humedad relativa para simular las condiciones adecuadas que propicien el fenómeno. Su practicidad, reproducibilidad y beneficios han sido discutidos ampliamente por Jimenez & Domínguez (2008), Jiménez & Moreno (2015), Leemann & Loser (2019), Li et al. (2019), Sanjuán et al. (2003), Ulloa et al. (2010).

Cuando los concretos de estudio han sido sometidos a tiempos de exposición a la carbonatación (Comisión Permanente del Hormigón, 2008; Jiménez & Moreno, 2015; Moreno, 2013; Vidaud, 2012) se sugiere calcular los coeficientes de carbonatación de la siguiente manera (Ecuación 3):

$$(3) \quad d = k\sqrt{t}$$

donde:

d Profundidad de carbonatación (en cm.), para un tiempo t (en años).

k Coeficiente de carbonatación (mm/año^{0.5}).

Ordenado para obtener un modelo de tiempo en el que se produzca la carbonatación a una distancia d , es (Ecuación 4):

$$(4) \quad t = \left(\frac{d}{k}\right)^2$$

Con este coeficiente de carbonatación (k), se puede inferir la calidad del concreto en cuanto a la resistencia a la carbonatación, de acuerdo a la literatura (Trocónis, 2000). Con dicho coeficiente, de acuerdo con el manual de la RED DURAR, se puede predecir el tiempo para que comience la corrosión por carbonatación, es decir, el tiempo en el que se carbonata el recubrimiento.

En cuanto a las pruebas naturales en contraste con las de carbonatación acelerada, existen discrepancias en los círculos científicos con respecto a la concentración adecuada de CO₂ para replicar el fenómeno acelerado en relación directa con el

fenómeno natural de carbonatación y el coeficiente de carbonatación (k) (Campos-Silva, A.R.; Fajardo, G.; Mendoza-Rangel, 2016) y con respecto a la cantidad adecuada de humedad relativa dentro de la cámara pues mientras algunos autores recomiendan un rango de entre 50-80%, otros consideran óptimo un rango mucho más ajustado, de entre 60-65% (Moreno, 2010; Papadakis et al., 1992; Yoon, 2007); otra barrera que enfrenta la aceptación de la carbonatación acelerada como método científico es la estandarización; sin embargo, de acuerdo con (Moreno, 2010) mientras el modelo de carbonatación acelerado se utilice como una prueba de estudio per se y no como un modelo (en el tiempo) de carbonatación natural, entonces es irrelevante la estandarización.

Por supuesto, prevalece la búsqueda de criterios definitivos, como son las ventajas/desventajas de los especímenes cilíndricos contra los prismas rectangulares, así como la respuesta de diferentes agregados (calizos o reciclados o con tratamiento bacteriano, por ejemplo) ante los efectos de la carbonatación natural y acelerada (Jiménez & Moreno, 2015; Moreno, 2013).

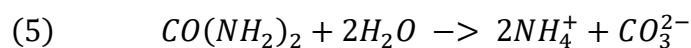
3.3. Concreto bacteriano y el fenómeno de autocurado

El fenómeno de la bioprecipitación (precipitación bacteriana) de CaCO_3 fue descrita primeramente por Boquet, E.; Boronat, A.; Ramos-Cormenzana (1973) a mediados del siglo pasado y comprobados sus efectos por Stocks-Fischer et al. (1999) a finales del siglo XX. En este estudio se menciona que, en un ambiente natural, los procesos de precipitación tienen lugar a lo largo del tiempo geológico, conectando grietas en formaciones rocosas altamente permeables, por lo que se propone como una herramienta de remediación alternativa a los medios convencionales.

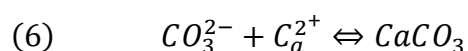
Dicho estudio asevera que la bacteria *B. pasteurii* (posteriormente renombrada como *Sporosarcina pasteurii*), no sólo proporciona un sitio de nucleación adecuado para la precipitación de calcita, sino que también crea un ambiente alcalino que promueve el abundamiento de la calcita. Lo que directamente incide en la remediación de micro-fisuras de hasta 2.7mm y en la disminución de la permeabilidad al igual que el incremento en la resistencia a la compresión.

De acuerdo con Nguyen et al. (2019) existen cuatro parámetros que indican la calidad de la bioprecipitación de calcita: la concentración de carbonato inorgánico disuelto, la concentración de calcio disponible, la presencia de sitios de nucleación y el pH del entorno.

El mecanismo por el que sucede la bioprecipitación (Jakubovskis et al., 2020; Saridhe & Selvaraj, 2021) es el siguiente: en presencia de la enzima ureasa ocurre la hidrólisis de la urea transformándola en amonio y dióxido de carbono, por lo tanto, la alcalinidad del medio aumenta. La reacción se indica en la Ecuación 5:



El pH alcalino deriva en la precipitación de carbonato de calcio cuando están presentes iones de calcio toda vez que se alcance un nivel de super saturación, como se muestra en la Ecuación 6 y se detalla en la Figura 3:



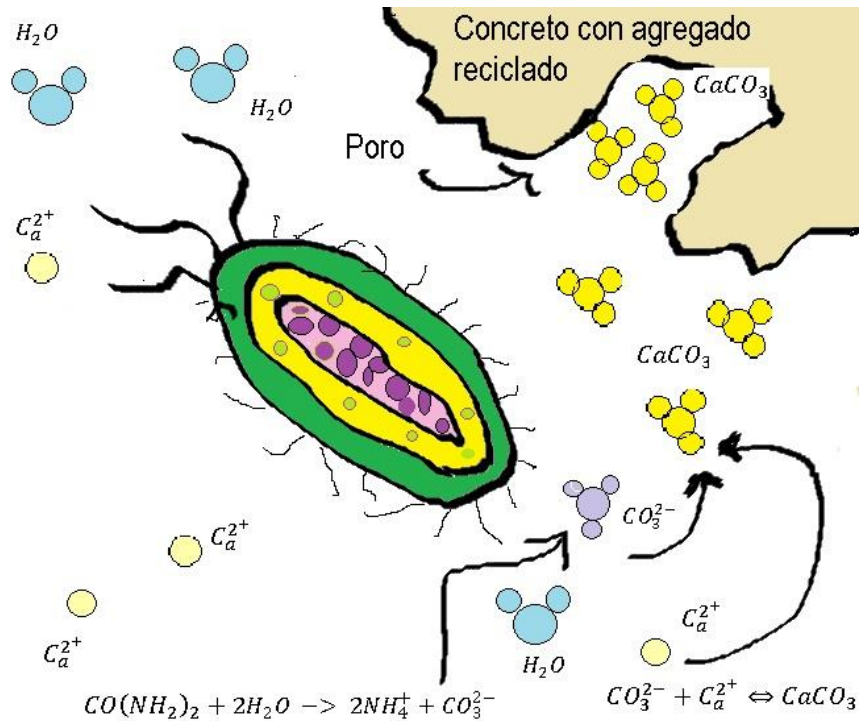


Figura 3. Proceso de la biodeposición de calcita ($CaCO_3$) al llenar los poros en el concreto. Elaboración propia.

La bacteria *S. pasteurii* no es la única que se ha utilizado para mejorar las propiedades del concreto, también se han explorado otras opciones. En conformidad con la investigación de Nguyen et al. (2019) y la de Jena et al. (2021), se ha experimentado con una multitud de bacterias como se muestra en la gráfica de la Figura 4, tales como *B. sphaericus*, *Shewanella* o *B. cohnii* (nombrando las alternativas usuales a la *S. pasteurii*). Por su parte Nguyen et al. (2019) determinaron que una avasallante mayoría de estudios (alrededor del 84% de ellos) se han concentrado en bacterias de la familia *Bacillus*. Esto se debe a la respuesta positiva de la bacteria en las propiedades físicas del concreto, entre otras razones, concretamente:

- Naturalmente se encuentran en estratos de suelo y forman esporas aun en condiciones desfavorables.
- Pueden mantenerse inactivas en un ambiente altamente alcalino (como el del concreto) hasta por 50 años.
- A través de la hidrólisis de la urea consiguen producir suficiente enzima ureasa para bioprecipitar carbonato de calcio ($CaCO_3$).

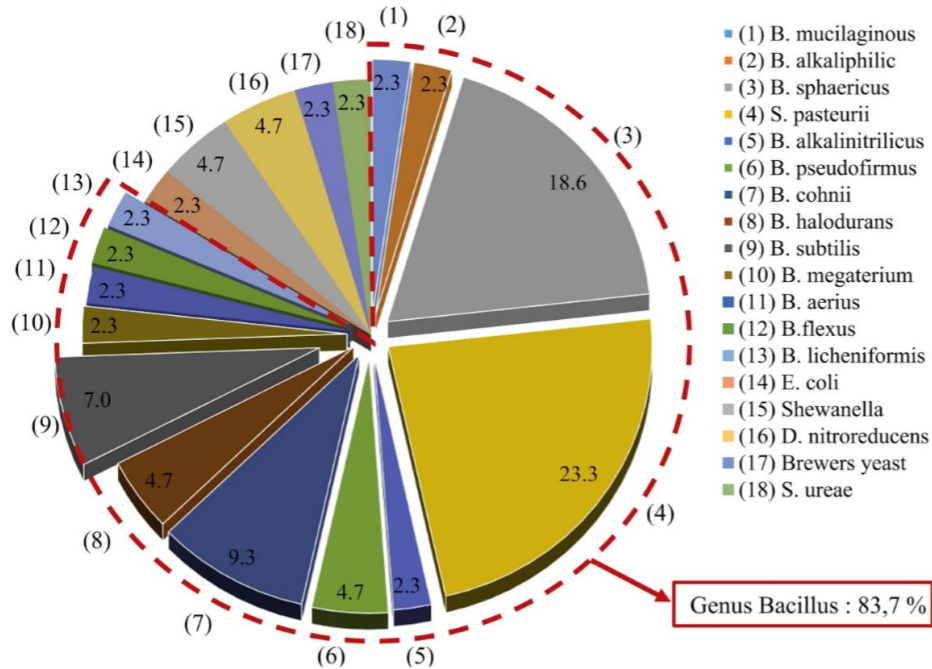


Figura 4 Relación estadística de la aplicación de bacteria en material cementante. Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H. & Cousture, A., 2019.

La *S. pasteurii* ha sido una opción popular debido a su disponibilidad y resultados positivos, incluido el aumento de resistencia mecánica donde se posiciona sobre otras bacterias (Nguyen et al., 2019), como se muestra en la gráfica de la Figura 5.

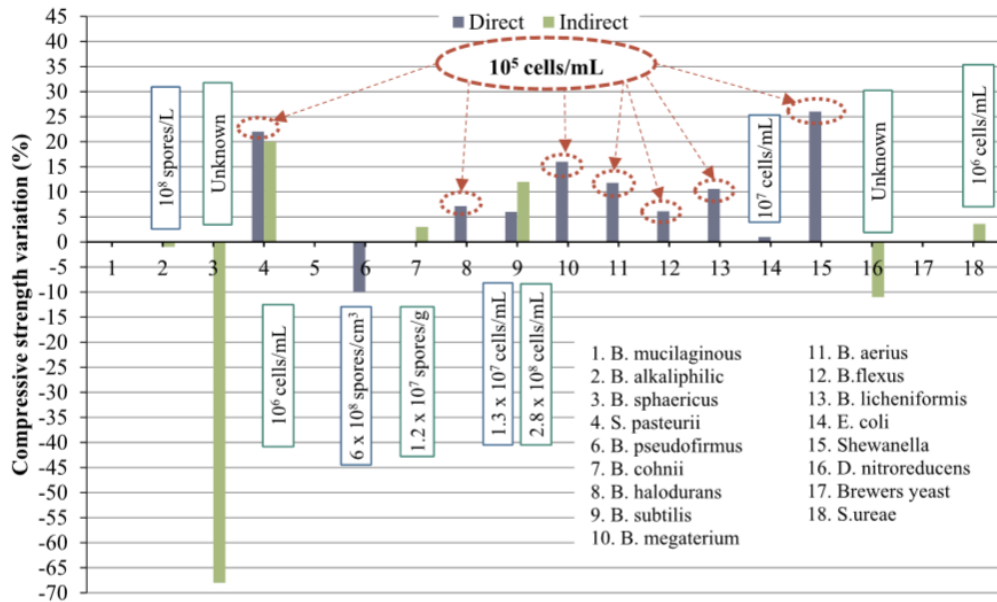


Figura 5. Efectos de la resistencia mecánica en concretos de estudio modificados con distintas bacterias. Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H. & Cousture, A., 2019.

Por su parte, Jena et al. (2021) determinaron que cuando una microgrieta se crea, se activa la bacteria embebida en el concreto, iniciando su actividad metabólica y formando una capa sólida y obstruyendo los poros y microporos del concreto. Una vez que las grietas y poros han sido completamente llenados la bacteria de nuevo inicia su periodo de hibernación. Los autores destacan que a pesar de existir un importante número de técnicas de autocurado, la técnica por adición de bacteria es la más efectiva, además, Roig-Flores et al. (2015) destacan que los procesos de autocurado suceden preferentemente en ambientes húmedos. Aunado a lo anterior, los autores realizaron un estudio de las concentraciones óptimas de bacterias por familia de bacteria, como se muestra en la gráfica de la Figura 6.

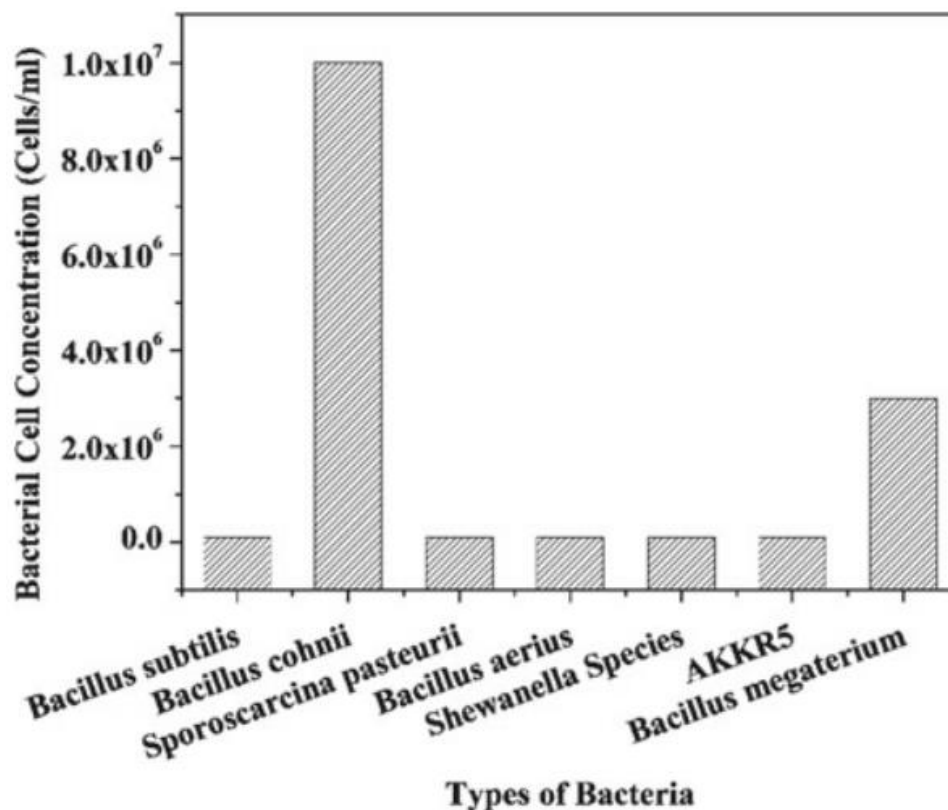


Figura 6. Varios tipos de bacterias con la concentración óptima para obtener la máxima resistencia a la compresión. Jena, S., Basa, B. & Panda, K.C., 2021.

Un importante número de autores han comprobado los efectos de utilizar la bacteria *S. pasteurii* en concretos (De Belie, 2016; Lee et al., 2015; Mondal & (Dey) Ghosh, 2018, 2019; Xu & Wang, 2018), en concretos con ceniza volante (Chahal et al., 2012), agregados gruesos y agregados finos (Feng et al., 2020), tratamiento

superficial de agregados reciclados de concreto (Grabiec et al., 2012; Qiu et al., 2014; Tam et al., 2021), en concretos con oxiclорuro de magnesio (*MgO*) (Xiao et al., 2021) y como tratamiento de residuos sólidos de la industria cementera para su reúso (Cuzman et al., 2015).

Los resultados de Chahal et al. (2012) sugieren que la adición de bacteria *S. pasteurii* en concreto de control (0% de ceniza volante) tiene un incremento en su resistencia a la compresión del orden de 22% con respecto a su contraparte sin bacteria.

De acuerdo con Lee et al. (2015) la adición de *S. pasteurii* disminuye el tiempo de hidratación del cemento y también aumenta su resistencia debido a la reducción de la porosidad con la calcita precipitada. Aunque menciona también que los resultados que arrojan los DRX y DSC/TGA no corroboraron la formación de calcita por el proceso de precipitación de calcita microbiológicamente inducida (MICP, por sus siglas en inglés), cuando la bacteria fue incorporada durante la etapa de mezclado.

Por otro lado, Xu & Wang (2018) recomiendan incorporar los agentes bacterianos al concreto fresco durante el proceso de mezclado. Y De Belie (2016), menciona que es necesario realizar más estudios enfocados a la técnica de adición de bacteria para competir con los tratamientos convencionales para reducir la absorción e incrementar la durabilidad en los materiales.

El estudio de Mondal & (Dey) Ghosh (2018) hace un análisis de concretos bacterianos en economías emergentes. En dicho estudio menciona los métodos de adición de la bacteria (adición directa o encapsulada), de ellos se menciona que la adición directa durante el mezclado con los nutrientes necesarios es la más asequible y prometedora. También, por su parte Nguyen et al. (2019) hacen mención de los métodos de aplicación, en los que distinguen:

- Un método directo, en el que la bacteria y sus nutrientes se introducen durante la etapa de mezclado.

- El segundo método, denominado “indirecto”, consiste en “encapsular” e inmovilizar las bacterias y sus nutrientes en otros materiales como hidrogel, cápsulas de vidrio, agregados ligeros, poliuretano, entre otros.

En cuanto a su relación con la durabilidad de los concretos, se ha demostrado que la adición de bacteria *S. pasteurii* incrementa la alcalinidad y esto indirectamente previene la corrosión, al igual que al disminuir la porosidad, aumentar la densidad y consolidar la ITZ aumenta la resistencia de los concretos ante la penetración de cloruros y la corrosión por efectos de carbonatación (Bisht et al., 2020; Cuzman et al., 2015; P. Li & Qu, 2015; Nosouhian et al., 2016; Ramachandran et al., 2001).

Sumado a lo anterior, la investigación de Nguyen et al. (2019), hace una recopilación de las respuestas de distintos tipos de bacteria en concretos expuestos a penetración de cloruros, como se observa en la gráfica de la Figura 7.

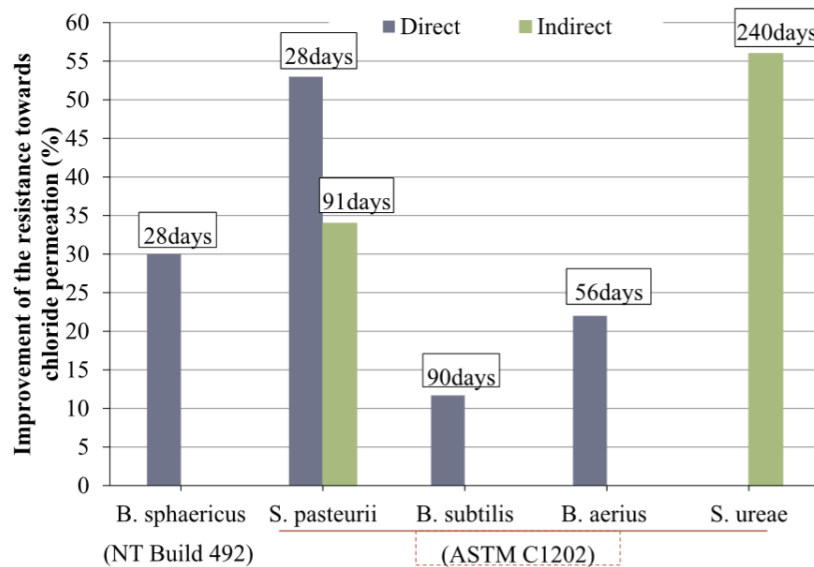


Figura 7. Respuesta ante migración de iones cloruro de concretos de estudio modificados con distintas bacterias. Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H. & Cousture, A., 2019.

Es claro que la *S. pasteurii* aparece como una opción prometedora para incrementar la durabilidad de concretos modificados en el corto y largo plazo. Por otro lado, hace evidente la necesidad de realizar otro tipo de estudios de durabilidad, como los de carbonatación y la viabilidad económica de su aplicación.

3.4. Conclusión del estado del arte

De acuerdo con la literatura consultada, queda claro el interés de la comunidad científica (especialmente los círculos que se dedican a la tecnología de la construcción) por explorar mecanismos alternativos, sostenibles y novedosos de mejoramiento del concreto. Este es el caso para el concreto bacteriano y los agregados reciclados.

La sustitución con agregados reciclados presenta ciertas desventajas con respecto a su contraparte natural, para su fortalecimiento existen numerosos métodos (Bai et al., 2020; Feng et al., 2020; Kisku et al., 2017; Shi et al., 2016). Entre ellos, la remoción del mortero adherido, el mezclado en dos fases y la bioprecipitación. Una de las miras de esta investigación es observar la influencia en materia de durabilidad de la bacteria *S. pasteurii* en concretos con sustitución total de agregado reciclado.

Es evidente que el uso de la bacteria *S. pasteurii* en concretos y agregados, mejora notablemente las propiedades de los mismos (Boquet, E.; Boronat, A.; Ramos-Cormenzana, 1973; Chahal et al., 2012; Feng et al., 2020), empero, el porcentaje y método de adición más favorables en concretos con sustitución es aún un terreno incierto que merece más investigación (Mondal & (Dey) Ghosh, 2018). En la investigación presente se opta por un método de adición “directa” durante el proceso de mezclado, de acuerdo con la literatura, el método más prometedor.

En materia de durabilidad de concretos, los dos fenómenos insignes son la penetración de cloruros y la carbonatación. Mientras para el primero existe normativa, abundantes estudios y equipos, la última presenta escasos estudios (principalmente debido a que el estudio de carbonatación es un área sumamente especializada), equipo creado *ad hoc* en muchos casos, además las normativas y recomendaciones distan mucho de ser “definitivas” por su reducido alcance.

La carbonatación es generalmente relegada debido a que erróneamente es común considerar la influencia del CO_2 como insignificante, incluso en zonas industriales o en sitios donde por efecto combinado este fenómeno trabaje en sinergia con la penetración de cloruros.

Este pensamiento es inaceptable en la actualidad, con la presión creciente de los efectos del cambio climático; como mencionan Farah et al. (2019) y de acuerdo con el IPCC (2018), en el curso de los años por venir se experimentará un incremento sostenido de los niveles de CO₂ en el planeta. Por lo tanto, como una propuesta adelantada a su tiempo, los estudios de carbonatación del concreto son de especial relevancia.

Un tema que dejan muy en claro autores como Nguyen et al. (2019) quienes realizaron una amplia investigación de concreto bacteriano, donde estudiaron los efectos en la durabilidad pero únicamente por penetración de cloruros y reconocen la necesidad de estudiar los efectos de la bacteria por otros métodos: “Few studies have focused on the effects of bacteria on the concrete gas permeability which is the most common indicator of durability [Muy pocos estudios se han enfocado en los efectos de las bacterias en la permeabilidad ante gases del concreto, el cual es el indicador más común de durabilidad]”. De acuerdo con el estudio antes mencionado, la deposición de calcita por bioprecipitación puede reducir la permeabilidad del concreto en un 32% a los 28 días.

Existe una escasez de estudios que relacionen la bacteria con la durabilidad (especialmente con base en estudios de carbonatación) en concretos y si se considera la sustitución del agregado reciclado, la cantidad disminuye drásticamente (Joshi et al., 2020; Kapoor & Bohroo, 2019; Tam et al., 2021). De igual forma, existe una cantidad muy limitada de estudios que hagan referencia a la viabilidad económica de la inclusión de la bacteria en las mezclas de concreto, máxime cuando se considera la utilización de agregados reciclados (dado que suelen abaratar algunos costos) (De Muynck et al., 2010; Tam et al., 2021).

Por lo tanto, es menester realizar esfuerzos académicos y científicos para crear literatura de alto valor en este respecto, ya que resta aún mucho territorio por conquistar en la ciencia para poder conciliar la microbiología con la industria de la construcción.

4. Metodología

4.1. Materiales

Para la presente investigación las muestras existentes se elaboraron en una investigación previa (por publicarse) considerando el método de factores empírico del ACI, determinándose su revenimiento, tamaño máximo del agregado, cantidad de agua, cemento, agregado grueso (grava) y agregado fino (arena).

Los materiales utilizados fueron cemento Portland ordinario (30 MPa), agregado grueso y fino de banco (obtenidos por trituración de piedra caliza en una cantera local), agregado grueso reciclado recuperado de elementos estructurales heterogéneos y triturado por mandíbulas (previo a su trituración los escombros se prepararon eliminando restos de armaduras de acero, partes de instalaciones hidráulicas o eléctricas, impurezas de arcilla, plásticos, vegetación y cualquier agente contaminante que se pudiera apreciar).

También se obtuvo la bacteria *Sporosarcina pasteurii*, adquirida por medio del laboratorio *Científica Senna*, con número de designación 11859. De igual manera, fueron proporcionados sus requerimientos de crecimiento y estabilización, a saber:

- Condiciones de crecimiento: Temperatura 30° C y ambiente aeróbico
- Condiciones de estabilización: Temperatura 2° C a 8° C

Asimismo, la reproducción de la bacteria se realizó en el laboratorio de Microbiología del Instituto Tecnológico de Chetumal.

Se cuenta con un total de 56 especímenes de concreto, pertenecientes a las familias de concretos de estudio con agregado reciclado (CAR) y agregado natural (CN), con dos porcentajes de adición de bacteria, 0.5% y 1.0% del peso del cemento.

4.2. Desarrollo Experimental

El diseño experimental se ha desarrollado en cuatro etapas: 1) Caracterización de especímenes de concreto existentes, 2) Periodo de exposición a la carbonatación natural, 3) Análisis del avance de la carbonatación, y 4) Modelación del tiempo de servicio del concreto modificado. En el diagrama de la Figura 8, se detallan las actividades y experimentación que componen esta investigación:

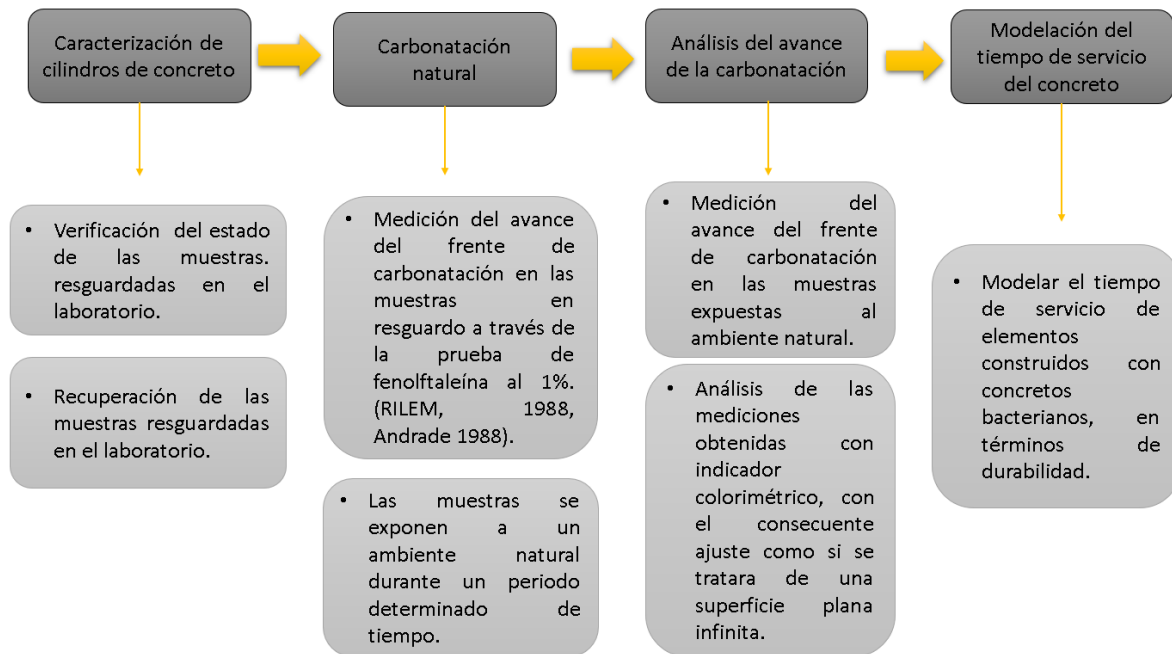


Figura 8. Desarrollo experimental que describe las etapas de la presente investigación. Elaboración propia.

De acuerdo con lo expuesto por Hernández-Sampieri et al. (2014), la presente investigación es del tipo experimental, con variables independientes identificadas y modificables, así como variables dependientes identificadas y medibles.

A saber, las variables independientes:

- 1) Relación agua/cemento (por requisitos de durabilidad y de diseño estructural)
- 2) Concentración de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* en las mezclas
- 3) Sustitución de agregado reciclado
- 4) Tiempo de exposición al ambiente natural

Asimismo, las variables dependientes:

- 1) La resistencia a la carbonatación de las muestras de concreto simple y concreto modificado, el avance de la carbonatación
- 2) El tiempo de servicio que se determina para los concretos de estudio, de acuerdo al avance de dicho frente de carbonatación

4.3. Unidades de Muestreo

Los concretos de estudio que se utilizan en la presente investigación son: relaciones agua/cemento de 0.5 y 0.7 (la primera responde a criterios de durabilidad y la segunda cumple con requisitos estructurales). Estas relaciones se complementaron con 100% de agregado reciclado y concentraciones de bacteria de 0.5% y 1% en peso de cemento.

Por lo tanto, existen ocho grupos experimentales, y cuatro grupos de control (o testigos). Los grupos experimentales son:

- 1) Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 0% de agregado reciclado y adición del 0.5% de bacteria *S. pasteurii*. (0.5 CN 0.5% B)
- 2) Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 0% de agregado reciclado y adición del 1.0% de bacteria *S. pasteurii*. (0.5 CN 1.0% B)
- 3) Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 100% de agregado reciclado y adición del 0.5% de bacteria *S. pasteurii*. (0.5 CAR 0.5% B)
- 4) Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 100% de agregado reciclado y adición del 1.0% de bacteria *S. pasteurii*. (0.5 CAR 1.0% B)
- 5) Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 0% de agregado reciclado y adición del 0.5% de bacteria *S. pasteurii*. (0.7 CN 0.5% B)
- 6) Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 0% de agregado reciclado y adición del 1.0% de bacteria *S. pasteurii*. (0.7 CN 1.0% B)
- 7) Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 100% de agregado reciclado y adición del 0.5% de bacteria *S. pasteurii*. (0.7 CAR 0.5% B)
- 8) Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 100% de agregado reciclado y adición del 1.0% de bacteria *S. pasteurii*. (0.7 CAR 1.0% B)

Establecidos los grupos experimentales, los grupos de control son:

- 1) Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 0% de agregado reciclado (0.5 CN)
- 2) Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 0% de agregado reciclado (0.7 CN)

- 3) Concreto simple relación agua/cemento 0.5, con 100% de agregado reciclado (0.5 CAR)
- 4) Concreto simple relación agua/cemento 0.7, con 100% de agregado reciclado (0.7 CAR)

Elaborándose cinco probetas para cada familia en el grupo experimental y cuatro probetas por cada familia en el grupo de control, con un total de 56 probetas cilíndricas de 7.5cm de diámetro y 15cm de altura.

4.4. Descripción de los procedimientos

Prueba de avance de la carbonatación, indicador colorimétrico

De acuerdo con (RILEM, 1988), este método consiste en determinar la profundidad de carbonatación en la superficie del concreto endurecido a través de un indicador colorimétrico. Por definición, una solución del 1% de fenolftaleína diluida en 70% de alcohol etílico es apropiada para determinar el avance del frente de carbonatación.

La fenolftaleína vuelve de un tono rojizo el concreto endurecido no carbonatado, mientras la superficie carbonatada no experimenta cambios de color. Aunque las recomendaciones de la RILEM hacen mención de prismas rectangulares, las recientes investigaciones de Moreno et al., (2004) y Jiménez & Moreno (2015) detallan el problema de las “lecturas esquina” en especímenes con esta geometría, por su parte, recomiendan encarecidamente el uso de cilindros con un ajuste de superficie plana infinita.

En los especímenes en cuestión se practica una fisura guiada con cincel y martillo para obtener un disco del concreto endurecido donde se realizará el procedimiento. Por cada cilindro se pueden obtener dos discos.

4.5. Secuencia de ejecución

Caracterización de cilindros de concreto

Esta primera caracterización cualitativa consistió en determinar el estado de los especímenes (especialmente debido a las condiciones no planeadas de resguardo durante la contingencia por el SARS-CoV-2) y el avance del frente de carbonatación en estado natural de resguardo con la prueba de indicador colorimétrico con fenolftaleína al 1% siguiendo las recomendaciones de la RILEM (1988), dado que los mencionados especímenes se encuentran en resguardo dentro del laboratorio.

Para la prueba de indicador colorimétrico se obtuvieron discos por cada familia de los concretos de estudio, practicando una ranura en la periferia del espécimen con el objetivo de guiar la fractura, con cincel y martillo se procedió a obtener la muestra.

Carbonatación natural

La carbonatación natural se llevó a cabo fuera de la institución, en un ambiente urbano de exposición con condiciones ambientales naturales (como se muestra en la Figura 9). Los cilindros se expusieron a la intemperie en la ciudad de Chetumal en la zona norte, donde predomina el clima cálido subhúmedo, con temperaturas medias mayores desde los 26° a 36°C, una humedad promedio de 70%. Durante los meses de octubre del 2020 a junio del 2021 se expusieron las probetas sin protección alguna y sobrellevaron condiciones ambientales diferentes a las existentes en el laboratorio durante el resguardo (periodo de 16 meses). Es decir, al momento de realizarse los ensayos se contaba con especímenes de aproximadamente 24 meses de antigüedad.

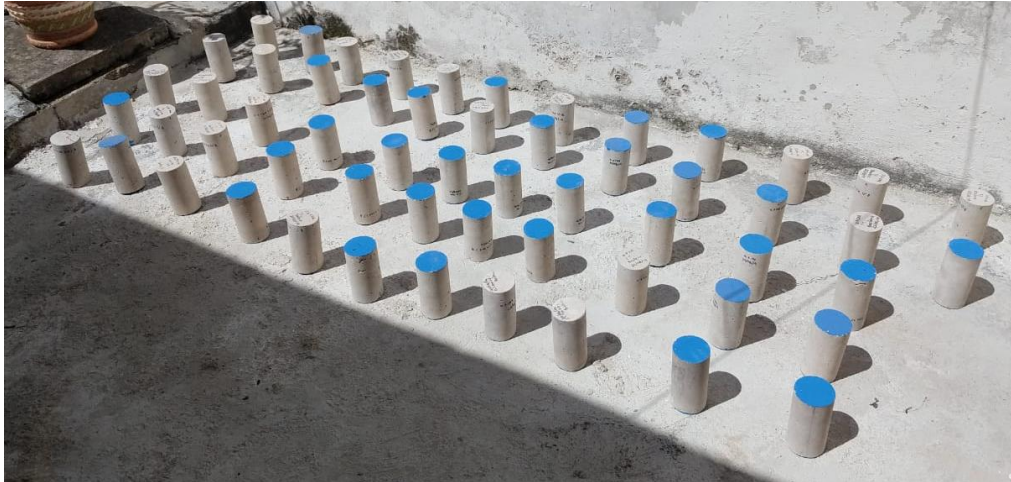


Figura 9. Exposición natural de los especímenes.

Análisis del avance del frente de carbonatación con indicador colorimétrico

Para el ensaye de las probetas con el indicador ácido-base descrito anteriormente se realizó el corte con cincel y martillo, guiando la fractura de esta manera. Cada probeta permitió obtener dos piezas en las que se roció la solución de fenolftaleína al 1% de acuerdo con lo establecido por el manual de la Red DURAR y la RILEM (RILEM, 1988; Trocónis, 2000) y se obtuvo la profundidad de carbonatación al medir el avance en los cuatro frentes principales: arriba, abajo, izquierda y derecha, tomando como referencia una marca distintiva en cada probeta, este proceso se realizó posterior a los meses de exposición designados (Octubre-Junio).

Como se mencionó antes, a cada probeta se le puede practicar un corte obteniendo dos discos. Las mediciones obtenidas debían ser promediadas y ajustadas individualmente para posteriormente realizar el ajuste de los frentes de carbonatación como si se tratase de superficies planas infinitas, dado que se trata de especímenes cilíndricos, proceso elucidado en L. F. Jiménez & Moreno (2015).

$$(7) \quad Pf = re \sqrt{(1-p)^2 \ln(1-p) + p(1 - \frac{p}{2})}$$

Pf , Profundidad de carbonatación ajustada para una forma plana infinita (mm).

re , radio nominal del espécimen de prueba (mm).

p , relación entre la profundidad de carbonatación promedio y el radio nominal.

Determinación del tiempo de servicio en años

Una vez realizadas todas las pruebas, a través del coeficiente de carbonatación del concreto (k) (Comisión Permanente del Hormigón, 2008; Vidaud, 2012), se determina el tiempo de servicio en años (en términos de durabilidad) de los concretos de estudio, como procedimiento final. A través de la Ecuación 4, se determina el tiempo en años que tomará para la carbonatación llegar al núcleo del concreto, exponiendo los aceros (en un concreto estructural) a los contaminantes nocivos del ambiente. La Ecuación 4, resulta de un despeje con respecto al tiempo de la siguiente manera:

$$(4) \quad t = \left(\frac{d}{k}\right)^2$$

El coeficiente de carbonatación tiene unidades en mm. sobre la raíz del año ($\text{año}^{0.5}$), que a su vez se obtiene individualmente con cada una de las medidas obtenidas de las probetas posterior a la exposición con fenolftaleína al 1%. Con este dato se puede realizar una comparación cuantitativa sobre la longevidad potencial de los concretos de estudio. Además, los datos obtenidos permitieron calcular el coeficiente de carbonatación (k) de cada concreto de estudio, así como la modelación del tiempo de servicio y la comparación con otra serie de datos de las probetas en cuestión.

5. Resultados

En las siguientes figuras puede apreciarse, a manera de ejemplo, el avance de los frentes de carbonatación en distintas familias de los concretos de estudio:



Figura 10. Avance del frente de carbonatación de las familias 0.7 CN, 0.7 CAR, 0.5 CN y 0.5 CAR con 0.5% de adición de bacteria.

Es meritorio mencionar que, en general, las probetas con mayor concentración de bacteria (0.5% y 1.0%) presentan una coloración violeta más cercana a los bordes de los discos obtenidos. Por otro lado, las mezclas de 0.5 a/c presentaron mayor coloración con respecto a su variante de 0.7 a/c, esto se debe principalmente a la cantidad de cemento que existe en la mezcla, derivando directamente en una densidad mayor del espécimen. Un fenómeno de interés que sucedió durante el ensaye del corte es que las probetas de 0.7 a/c requirieron menos golpes con el cincel y presentaron una coloración acumulada en el centro, en contraste con las variantes en 0.5 a/c.

En algunas probetas, la coloración cercana a los bordes (mayor densidad) se presentaba incluso en las variantes de 0.5 a/c con AR siempre que existía presencia de bacteria (0.5% o 1.0%), sugiriendo una mejora sobre los concretos reciclados.



Figura 11. Probetas ensayadas a través de la prueba ácido-base con solución de fenolftaleína al 1%.

En la Figura 11 se presentan todos los especímenes ensayados, en donde algunas de las muestras presentan una interrupción en la coloración, este fenómeno se debe principalmente a la presencia de agregado grueso que no interactúa (no se torna violeta) con la solución de fenolftaleína al 1%. Se pudo apreciar, además, un patrón distintivo en cuanto a la coloración de los especímenes 0.5 a/c y 0.7 a/c, así como también entre la familia con agregado natural (CN y CAR). La tendencia pre-análisis indica que a mayor concentración de bacteria mayor la coloración en los discos, y a menor relación a/c mayor coloración también.

5.1. Ajuste del frente de carbonatación

Toda vez que se obtuvieron las medidas correspondientes al avance del frente de carbonatación en los cuatro frentes correspondientes se procedió a ajustar los avances con el procedimiento descrito anteriormente, como si se tratase de una superficie plana infinita (Pf). Donde se obtuvieron los resultados siguientes (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**):

Tabla 2. Frentes de carbonatación ajustados para los concretos de estudio. Elaboración propia.

<i>Mezcla</i>	<i>Frentes de carbonatación ajustados (cm)</i>			
0.5 CN	0.559	0.607	0.653	0.792
0.5 CN/0.5% B	0.751	0.584	0.512	0.705
0.5 CN/1.0% B	0.751	0.638	0.577	0.584
0.5 CAR	0.806	0.906	0.861	0.786
0.5 CAR/0.5% B	0.796	0.441	0.796	0.417
0.5 CAR/1.0% B	0.652	0.528	0.561	0.551
0.7 CN	1.201	1.200	1.008	1.005
0.7 CN/0.5% B	1.071	1.062	1.014	1.014
0.7 CN/1.0% B	1.003	1.023	1.047	1.006
0.7 CAR	1.147	1.178	1.135	1.123
0.7 CAR/0.5% B	1.157	1.142	1.133	1.142
0.7 CAR/1.0% B	1.143	1.146	1.142	1.141

Con los respectivos avances del frente de carbonatación para cada familia de concretos se procedió a obtener los coeficientes de carbonatación natural (k) por cada elemento y su promedio, a través del procedimiento descrito por la RILEM (1998) y Vidaud (2012), que se resume en la Ecuación 8, resultado de un despeje de la ecuación que relaciona la distancia con el tiempo de carbonatación medido (Ecuación 3):

$$(3) \quad d = k\sqrt{t}$$

$$(8) \quad k = \frac{d}{t^{0.5}}$$

Obteniendo los resultados que se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

5.2. Coeficientes de carbonatación natural

Tabla 3. Coeficientes de carbonatación natural (k) obtenidos a partir de los frentes de carbonatación ajustados. Elaboración propia.

Mezcla	Coeficientes de carbonatación natural (k) ($\text{mm/año}^{0.5}$)				
	Valores individuales ($\text{mm/año}^{0.5}$)				Promedio ($\text{mm/año}^{0.5}$)
0.5 CN	3.956	4.289	4.620	5.602	4.617
0.5 CN/0.5% B	5.311	4.131	3.621	4.985	4.512
0.5 CN/1.0% B	5.311	4.511	4.078	4.130	4.507
0.5 CAR	5.701	6.407	6.086	5.558	5.938
0.5 CAR/0.5% B	5.628	3.116	5.628	2.946	4.329
0.5 CAR/1.0% B	4.612	3.733	3.965	3.894	4.051
0.7 CN	8.489	8.487	7.125	7.106	7.802
0.7 CN/0.5% B	7.576	7.511	7.173	7.173	7.358
0.7 CN/1.0% B	7.096	7.231	7.401	7.115	7.211
0.7 CAR	8.108	8.331	8.026	7.938	8.101
0.7 CAR/0.5% B	8.183	8.072	8.015	8.072	8.086
0.7 CAR/1.0% B	8.083	8.100	8.072	8.065	8.080

Es menester mencionar que el manual de la Red Durar (Trocónis, 2000) identifica a los coeficientes de carbonatación (k) mayores a $6 \text{ mm/año}^{0.5}$ como concretos de muy baja resistencia a la carbonatación, mientras aquellos que poseen un coeficiente de 2 o hasta $3 \text{ mm/año}^{0.5}$ son considerados como concretos con elevada resistencia a la carbonatación. Los resultados antedichos se presentan en las gráficas de la Figura 12.

Es notable que las familias de concreto con mezclas 0.5 a/c cumplen con los parámetros de la Red Durar con un nivel aceptable ($< 6 \text{ mm/año}^{0.5}$) con una mejora marginal conforme aumenta la concentración de bacteria en la mezcla, aquella con 1% de adición de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* obtuvieron mejores resultados que sus contrapartes, tanto para concretos normales (CN) como con concretos con agregados reciclados (CAR). Por su parte, las mezclas de 0.7 a/c presentan un coeficiente más elevado que el de las mezclas 0.5 a/c superando el nivel aceptable de la Red Durar, pero manteniendo un patrón similar con respecto al aumento de la concentración de bacteria (a mayor % de bacteria menor coeficiente k).

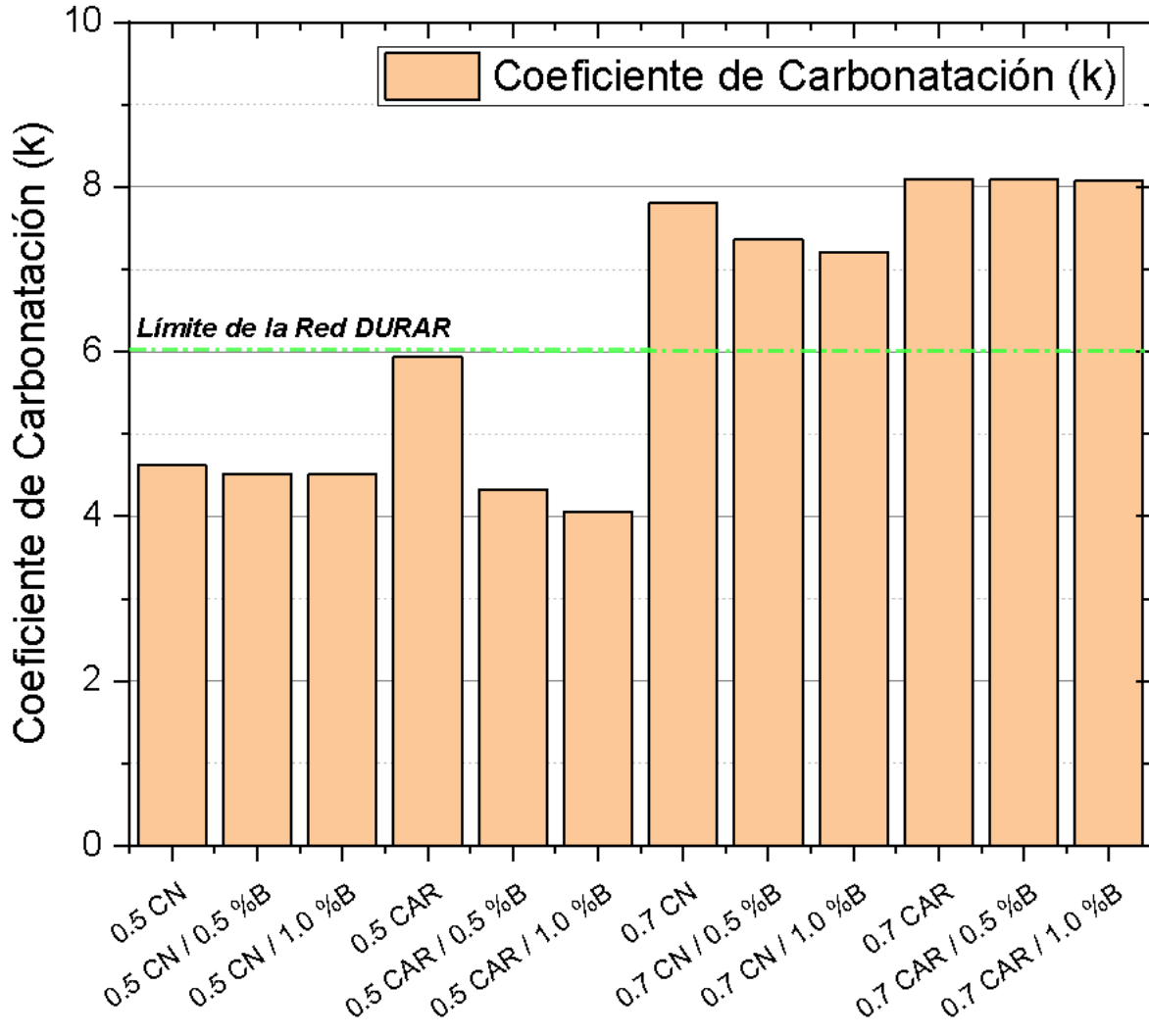


Figura 12. Gráfica de barras en los que se presenta el coeficiente de carbonatación (k) por cada concreto de estudio y el límite establecido por la Red Durar. Elaboración Propia.

5.3. Coeficiente de carbonatación, porosidad y sorptividad

Se compararon los coeficientes de carbonatación (k) con datos de sorptividad (velocidad de absorción capilar medida en $\text{mm/h}^{0.5}$) y porosidad de las probetas ensayadas que fueron obtenidos en investigaciones por publicarse. Como puede apreciarse en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y la gráfica de la Figura 13. La porosidad y la sorptividad presentan un comportamiento similar y coincidente con el coeficiente de carbonatación (k), esto sugiere que al aumentar

la concentración de bacteria en la mezcla se presenta una menor absorción, una menor porosidad y por tanto un menor coeficiente de carbonatación.

Tabla 4. Relación entre el coeficiente de carbonatación (k) obtenido en la presente investigación, la porosidad y la sorptividad de los concretos de estudio. Elaboración propia.

Mezcla	Coefficientes de carbonatación (k)	Porosidad	Sorptividad
0.5 CN	4.617	10.72%	9.00
0.5 CN/0.5% B	4.512	10.40%	9.50
0.5 CN/1.0% B	4.507	7.08%	8.50
0.5 CAR	5.938	11.82%	9.50
0.5 CAR/0.5% B	4.329	10.67%	8.50
0.5 CAR/1.0% B	4.051	9.12%	8.00
0.7 CN	7.802	12.88%	9.50
0.7 CN/0.5% B	7.358	11.58%	9.00
0.7 CN/1.0% B	7.211	10.93%	8.50
0.7 CAR	8.101	13.98%	10.50
0.7 CAR/0.5% B	8.086	13.11%	10.00
0.7 CAR/1.0% B	8.080	12.38%	9.50

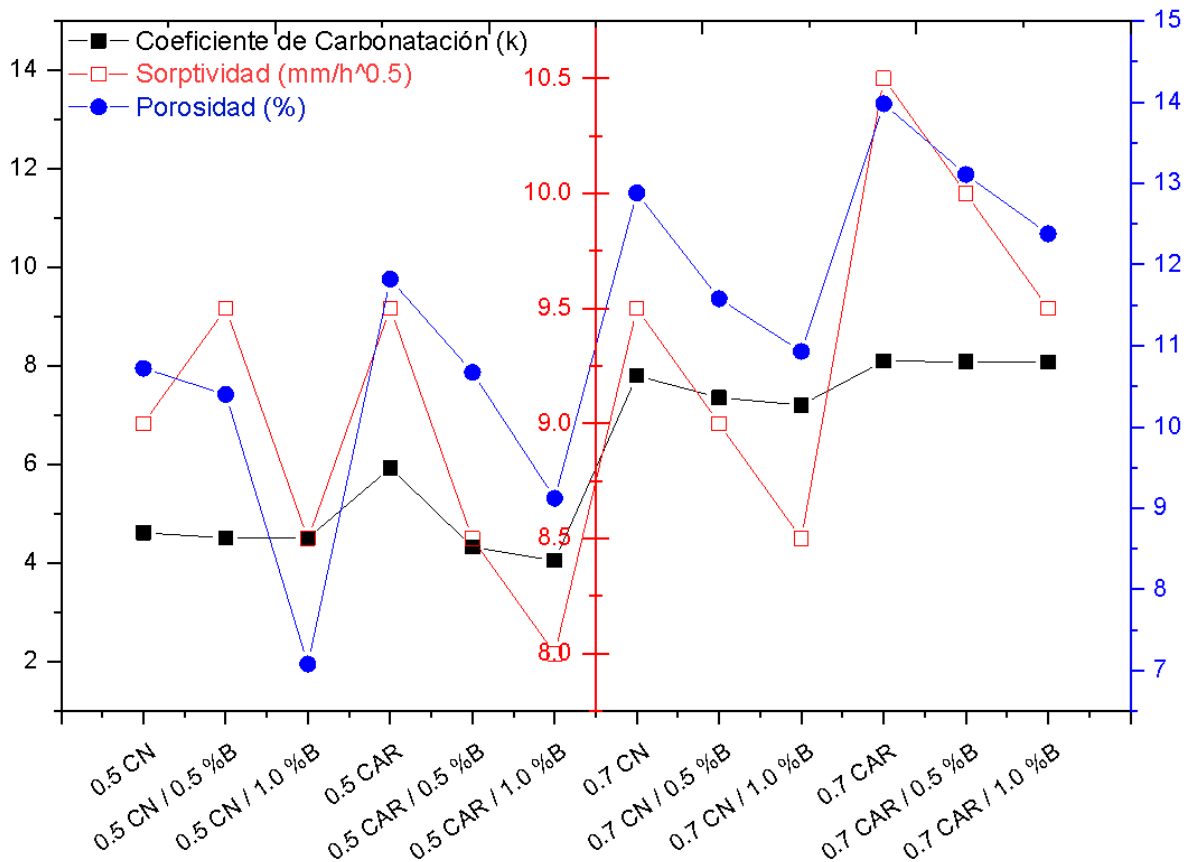


Figura 13. Gráfica triple eje en donde se presenta el comportamiento del coeficiente de carbonatación (k) junto a la porosidad y la sorptividad. Elaboración propia.

Especialmente en la gráfica de la Figura 13, es donde se puede apreciar la tendencia de los concretos con mayor concentración de bacteria y la correlación entre dicha concentración, el coeficiente de carbonatación (k), la porosidad y la sorptividad. Los menores valores los obtuvieron las mezclas con concentraciones del orden de 1% de adición de bacteria.

5.4. Modelación del tiempo de servicio

La modelación del tiempo de servicio se realizó utilizando la ecuación fundamental del coeficiente de carbonatación natural establecido por la RILEM y explicado en detalle en el manual de la Red Durar (RILEM, 1988; Trocónis, 2000), la Ecuación 4 modificada es como sigue:

$$(4) \quad t = \left(\frac{d}{k}\right)^2$$

donde:

d Profundidad de carbonatación (mm), para un tiempo t (años).

k Coeficiente de carbonatación (mm/año^{0.5}).

Con dicha ecuación se obtuvo la modelación del tiempo de servicio en años para cada concreto de estudio con recubrimientos de 3, 4 y 5 cm. (ver **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Tabla 5. Modelación del tiempo de servicio en años para los concretos de estudio con escenarios hipotéticos de recubrimientos del orden de 3.0 cm. y 5.0 cm. Elaboración propia.

Mezcla	Coeficiente de carbonatación (k) (mm/año^{0.5})	Años (3 cm)	Años (4 cm)	Años (5 cm)
0.5 CN	4.617	42.22	75.06	117.28
0.5 CN/0.5% B	4.512	44.21	78.59	122.80
0.5 CN/1.0% B	4.507	44.30	78.75	123.05
0.5 CAR	5.938	25.53	45.38	70.90
0.5 CAR/0.5% B	4.329	48.02	85.36	133.38
0.5 CAR/1.0% B	4.051	54.84	97.50	152.34
0.7 CN	7.802	14.79	26.28	41.07
0.7 CN/0.5% B	7.358	16.62	29.55	46.17
0.7 CN/1.0% B	7.211	17.31	30.77	48.08
0.7 CAR	8.101	13.72	24.38	38.10
0.7 CAR/0.5% B	8.086	13.77	24.47	38.24
0.7 CAR/1.0% B	8.080	13.79	24.51	38.29

Esta modelación de tiempo de servicio considera la estructura en condición funcional antes de que la carbonatación haya llegado al refuerzo, es por ello que se plantearon tres escenarios, uno con un recubrimiento de 3.0 cm., 4.0 cm. y otro con 5.0 cm, los últimos responden a criterios descritos en ACI 318S-14 (2014), que indican los recubrimientos mínimos para concretos expuestos a la intemperie, descrito como “Expuesto a la intemperie o en contacto con el suelo” para cualquier tipo de miembro y especificado con recubrimientos especificados de 50mm y 40mm para los refuerzos más comunes.

Se debe destacar la diferencia que 1.0 o 2.0 cm. de recubrimiento tienen en cuanto a los años del tiempo de servicio, ya que en los casos en los que se obtuvo un coeficiente menor a 6.0 mm/año^{0.5} (0.5 CN y 0.5 CAR) los intervalos de años van

desde 25 años en el caso más desfavorable hasta 152 años en el mejor escenario. Por otro lado, las mezclas con 0.7 a/c se obtuvieron los peores escenarios: desde 13 años hasta 48 años. Este comportamiento sigue un patrón lógico considerando que todas las mezclas de 0.7 a/c se posicionaron sobre el valor límite establecido por la Red Durar. Bajo ninguna circunstancia es aceptable un concreto con tiempo de servicio estimado en 13 años (en promedio), valor obtenido por las familias correspondientes a 0.7 CAR y 3 cm de recubrimiento. Las familias de 0.7 CN y 4.0cm. de recubrimiento alcanzaron 26 años, aumentando a 30 años cuando se le adiciona una concentración de bacteria del 1% (0.7 CN/1.0% B).

Por supuesto, es necesario recalcar que esta modelación responde a un escenario dispuesto de tal manera que la única variable importante es el avance del frente de carbonatación, por lo que al considerar otros factores como el ingreso de iones cloruro o el desprendimiento del recubrimiento por malas prácticas pueden demeritar aún más el tiempo de servicio estimado.

6. Discusión

La presente investigación se encuentra enfocada en concretos bacterianos con agregados reciclados expuestos a carbonatación natural, basándose en posibles efectos benéficos en el comportamiento mecánico y de durabilidad del mismo, la recolección de fuentes de consulta se realizó a través de dos bases de datos principalmente: ScienceDirect y SpringerLink, debido principalmente a que ambas producen y aceptan únicamente investigaciones denominadas en el ámbito académico como 'top tier'. Se consultaron aproximadamente 125 trabajos relacionados con los temas mencionados anteriormente, con un espectro temporal del año 1973 hasta el primer trimestre del año 2021. Las palabras clave ('keywords') utilizadas en ambas bases de datos son: 'effects of CO₂ on concrete', 'self-healing concrete', 'Sporosarcina pasteurii concrete', 'recycled aggregate concrete treatment', 'recycled aggregate concrete bacteria-mediated', 'Microstructural analysis of bacteria-mediated concrete', 'economic feasibility bacterial concrete', 'cement hydration', 'construction demolition waste cycle', 'bacteria concentration on concrete', 'concrete improvement through carbonation', 'recycling of demolition waste', 'phenolphthalein indicator test'.

En esta investigación se ensayaron probetas expuestas a carbonatación natural en intemperie y realizando pruebas de ácido-base con solución de fenolftaleína al 1% para determinar el avance del frente de carbonatación con el fin de obtener el coeficiente de carbonatación (k) y estimar el tiempo de vida de las familias de concreto (concretos de estudio) compuestas por mezclas de 0.5 y 0.7 de concreto normal (CN, 100% Agregado Natural) o con agregado reciclado (CAR, 100% Agregado Reciclado), con adición de bacteria del 0.5% y 1.0% con respecto al peso del cemento.

Asimismo, se revisó y comentó el estado del arte en el que se encuentra la adición de bacterias (especialmente la bacteria *Sporosarcina pasteurii*) a concretos para mitigar los efectos de la corrosión e incrementar sus propiedades mecánicas y de durabilidad, tanto la resistencia a la compresión como la resistencia al ingreso de agentes contaminantes como pueden ser iones cloruros.

En los capítulos anteriores se señaló el contraste notorio entre concretos naturales y concretos bacterianos (llamados también bio-concretos), tanto en sus propiedades mecánicas y de durabilidad como de sus diferencias relativas al costo-beneficio, al mismo tiempo se consideró una variable de sensible importancia en el apartado de sostenibilidad y desempeño del concreto: los agregados reciclados.

6.1. Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que existe una correlación entre la concentración de bacteria en la mezcla de concreto y un correspondiente aumento en la durabilidad del concreto en cuestión, ya que los datos obtenidos indican que mientras aumenta la concentración de bacteria su actividad en la matriz para incrementar igualmente, notable en la reducción del coeficiente de carbonatación (k), la porosidad y la sorptividad, evidente en el comportamiento de la gráfica de la Figura 13, en donde se aprecia una disminución en el coeficiente (k), la porosidad y la sorptividad en las siguientes familias de concretos: 0.5 CN/1.0% B, 0.5 CAR/1.0% B, 7.0 CN/1.0% B y 0.7 CAR/1.0% B.

El análisis realizado indica una tendencia: a mayor concentración de bacteria mejores resultados. Esta tendencia coincide con lo expuesto por Nguyen et al. (2019), Bisht et al. (2020), Chen et al. (2020), *inter alia*; esto a pesar de utilizar procedimientos experimentales y técnicas de inoculación diferentes.

Las mezclas de 0.7 a/c obtuvieron valores del coeficiente (k) mayores al intervalo que indica la Red Durar (Trocónis, 2000), indicando una resistencia disminuida a la carbonatación, inherente a la calidad de las mezclas tipo 0.7 a/c y en conjunto con las variaciones de AR. En donde a propósito de los AR, la familia de concretos 0.5 CAR se quedó cerca del límite aceptable de $6 \text{ mm/año}^{0.5}$ mencionado anteriormente (con $5.938 \text{ mm/año}^{0.5}$), sin embargo, cuando se le adicionó 1% de bacteria en proporción del peso del cemento (0.5 CAR/1.0% B) su coeficiente disminuyó a $4.051 \text{ mm/año}^{0.5}$, una diferencia de cerca del 32%.

Es por ello que es meritorio mencionar que la mezcla que obtuvo el menor coeficiente de carbonatación (k) fue la 0.5 CAR/1.0% B con $4.051 \text{ mm/año}^{0.5}$, superando los resultados del espécimen de control con agregado normal (0.5 CN) y el espécimen de control con agregado reciclado (0.5 CAR).

Este comportamiento se relaciona directamente con la actividad bacteriana, puesto que los menores coeficientes de carbonatación los obtuvieron las variantes con la mayor concentración de bacteria (1.0%). Atribuible a la redensificación del núcleo del concreto producto de la precipitación de calcita. A pesar de que la mezcla 0.5 CN tiene una densidad mayor debido a una mayor cantidad de cemento, el coeficiente de carbonatación (k) mejoró marginalmente con una adición de bacteria al 1.0%, $4.617 \text{ mm/año}^{0.5}$ y $4.507 \text{ mm/año}^{0.5}$, respectivamente.

En otras palabras, a menor coeficiente de carbonatación mayor resistencia a la carbonatación, pues este coeficiente expresa la relación entre el avance del frente de carbonatación y el tiempo en años que tomó dicho avance, es de esta manera en que el tiempo de servicio se relaciona con el coeficiente de carbonatación (k). Es así que, la modelación del tiempo de servicio corrobora la tendencia mencionada anteriormente, además de otorgar un punto de vista menos abstracto ya que se presenta en años, donde se puede apreciar la diferencia de 1.0 o 2.0 cm. de recubrimiento en años de servicio en cuanto a resistencia a la carbonatación natural se refiere.

En las mezclas de 0.5 CN/1.0% B mejoró el tiempo estimado de servicio en cerca de 4 años en comparación con su espécimen de control, con un recubrimiento mínimo de 40mm especificado en el ACI 318S-14 (2014), dado que la única variante existente entre dichas muestras es la concentración de bacteria, este comportamiento se le atribuye también a la actividad bacteriana. En la familia 0.5 CAR/1.0% B se notó una mejora sustancial en este mismo aspecto, con un incremento de 52 años con respecto a su contraparte de control para un recubrimiento mínimo de 40mm, resultado acorde con el incremento de 32% de la resistencia a la carbonatación.

Los especímenes de 0.7 a/c merecen una investigación más profunda pues, aunque en algunos países cumplen con criterios estructurales y son mezclas económicas, sus deméritos en cuanto a la resistencia a los agentes externos (durabilidad), así como su resistencia mecánica deben contrastarse para obtener un adecuado análisis costo-beneficio.

La característica que también es importante para la adaptación de los concretos bacterianos en la industria de la construcción corresponde al apartado de durabilidad, esta característica engloba numerosos aspectos como la porosidad, la permeabilidad, la capilaridad, la densidad y la resistencia ante el ingreso de agentes contaminantes.

Lo anterior es especialmente relevante cuando se considera la familia 0.7 CAR (agregado reciclado), que podría verse beneficiada de otras alternativas o hasta de un incremento en la concentración de bacteria, que podría mejorar de manera drástica sus propiedades para llevarlo a por lo menos un nivel aceptable. Por lo menos en la presente investigación sus resultados no son favorables.

La literatura (Bisht et al., 2020; Jena et al., 2021; Mondal & (Dey) Ghosh, 2019; Nguyen et al., 2019) sugiere que ciertos procesos detonados por la actividad bacteriana pueden aumentar la resistencia de los concretos bacterianos, es decir, una disminución de la absorción, una disminución de la porosidad, un incremento en la resistencia mecánica y además -a nivel micro- una generación de productos de hidratación (produciendo a su vez una redensificación del concreto). Una parte de estos efectos han encontrado confirmación en la presente investigación con un método de adición directa no-esterilizada y bajo condiciones naturales de carbonatación.

6.2. Viabilidad económica de la inclusión de bacterias al concreto

Con respecto al mejoramiento de las propiedades del concreto a través de técnicas de autocurado se han explorado un gran número de alternativas: tanto aditivos como adiciones de adhesivos, minerales y bacterias. Tal como menciona la investigación

de Jena et al. (2021), de las técnicas que se mencionaron anteriormente las bacterias son las más efectivas y se ha convertido en un área importante de investigación.

Naturalmente, las bacterias representan un amplio espectro de familias que pueden ser utilizadas para el mejoramiento de las propiedades del concreto. Sin embargo, no todas las familias o los tipos de bacterias tienen un desempeño similar, ni un costo-beneficio similar. Como se puede apreciar en capítulos anteriores, entre las bacterias la familia más utilizada corresponde a la *Bacillus* y dentro de dicha familia los mejores resultados los ha reportado la bacteria *S. pasteurii* (Bisht et al., 2020; Jena et al., 2021; Nguyen et al., 2019). El efecto positivo de esta y otras bacterias ha sido comentado en capítulos anteriores, así como los usos específicos en los que se han aplicado.

Existen muy pocos estudios realizados respecto a la evaluación costo-beneficio de la adición de bacterias y la bioprecipitación en concretos (Achal et al., 2011; Andalib et al., 2016). Uno de los estudios más completos en la materia corresponde al realizado por De Muynck et al. (2010), quienes determinaron ciertos puntos importantes:

- Dentro del espectro de procesos metabólicos de las bacterias utilizadas en la técnica de bioprecipitación el que denota mejores resultados es el de hidrólisis de urea, y por tanto, las bacterias que utilicen este proceso metabólico son económica y eficientemente más viables, ya que son las que más pronto producen iones carbonato, por ende, propiciando con mayor velocidad la precipitación de carbonato de calcio.
- Se necesita realizar más investigaciones con respecto al tipo de adición de bacterias (directo e indirecto), así como de los nutrientes con los que es inoculada.
- Debido al precio de sus componentes, es sumamente complicado que la técnica de bioprecipitación bacteriana pueda sustituir a otras técnicas comúnmente usadas, es por ello que el énfasis de la técnica yace precisamente en el “valor añadido” que la bioprecipitación aporta en comparación con las demás técnicas.

- La técnica de bioprecipitación bacteriana se plantea también como una alternativa amigable con el medio ambiente, como mencionan Bisht et al. (2020); otras técnicas como los inhibidores de corrosión convencionales son de bajo costo (lo que lo convierte en una técnica popular), sin embargo, las mezclas de estos inhibidores tienen un significativo contenido de nitritos y cromatos, dañinos para el ambiente y potencialmente peligrosos para el bienestar humano.
- La viabilidad de la técnica de bioprecipitación se encuentra fuertemente relacionada con el tiempo de deposición y con el tipo de estructura cristalina del CaCO_3 (vaterita o calcita) precipitada, dependiendo también del tipo y la concentración de bacteria utilizada.

De acuerdo con la literatura (Jena et al., 2021), no existe un diseño de concreto con adición de bacterias que garantice el 100% de desempeño de la actividad bacteriana, aunado a lo anterior, no existe un consenso general sobre la cantidad adecuada ni el mejor tipo de bacteria para este tipo de técnica, aunque sí existe una premisa generalmente aceptada de utilizar únicamente bacterias inoñas para el ser humano. En opinión de algunos autores (Achal et al., 2011; Bisht et al., 2020; Chen et al., 2020; Mondal & (Dey) Ghosh, 2018; Nguyen et al., 2019), la inclusión de bacterias precursoras de bioprecipitación es una opción prometedora para mejorar las propiedades de resistencia y durabilidad del concreto, a corto y largo plazo, además de presentar un “valor agregado” en justificación del premium en su costo.

6.3. Dificultades de la inoculación de bacterias al concreto

Como se mencionó anteriormente, desde el punto de vista de eficacia de las bacterias en términos de mejora de resistencia del concreto no existe un consenso en la literatura con respecto a la cantidad porcentual de mejora, incluso bajo condiciones experimentales similares y aun entre estudios sobre una misma bacteria en cuestión.

De igual manera, Amer Algaifi et al. (2020) destacan que en los estudios en los que se evalúan los tiempos y eficiencia de sellado en fisuras por análisis de imágenes

fotográficas tampoco existen pruebas determinantes sobre dicha eficiencia ni un consenso sobre la cantidad efectiva de tiempo en el que se lleva a cabo el sellado de fisuras, algunas pudiendo tomar tan pronto como veintiocho días y otras tardando cerca de cien días.

En el mismo trabajo se menciona que tan solo algunos estudios han considerado los factores que intervienen en la precipitación de CaCO_3 , es decir, qué factores previenen o favorecen la bioprecipitación de calcita. Este asunto es tomado en consideración también por Bisht et al. (2020) y Bergh et al. (2020), quienes concluyen que es posible deducir que además de calcita la bacteria posibilita la formación adicional de productos de hidratación (C-S-H) durante el proceso de bioprecipitación, un factor concomitante que a su vez forma una capa protectora en el núcleo y permite aumentar la resistencia ante el ingreso de agentes externos así como mejorar la resistencia mecánica. Es notorio que los autores identifican dicha producción de productos de hidratación como “masiva”.

El efecto anterior es por supuesto benéfico para el concreto, sin embargo, es a menudo soslayado en distintas investigaciones enfocadas principalmente en la mejora en la resistencia a la compresión de los concretos bacterianos. De igual manera factores perjudiciales son frecuentemente soslayados por los investigadores, como son la temperatura a la que la bacteria trabaja con máxima eficiencia o el pH al que la bacteria comienza su etapa activa, es decir, termina su etapa de hibernación, o el tiempo de actividad total de la bacteria.

Otro factor que incide en la eficiencia de la bioprecipitación es la naturaleza de los agregados o el tipo de cemento utilizado, como destacan Xiao et al. (2021), en una investigación novedosa en la que se empleó cemento de Sorel o cemento de oxiclورو de magnesio (MgO) en conjunto con la bacteria *Sporosarcina pasteurii*, donde la evidencia sugiere que existe un incremento en la resistencia a la compresión en relación exponencial al tiempo aún en dicho tipo de cementos.

En cuanto al vehículo por el que se inocular la bacteria en el concreto (Saridhe & Selvaraj, 2021; Singh et al., 2020), se ha mencionado antes la investigación de Mondal & (Dey) Ghosh (2018) y Maqbool & Singh (2019), quienes enfocan el

objetivo de su estudio en determinar la opción más conveniente para implementar y aprovechar la inoculación de bacterias en el concreto en economías emergentes.

En dichos estudios se dividen los medios de aplicación en directa e indirecta, los primeros consisten en mezclar la bacteria con los nutrientes y el agua, para posteriormente inocular la bacteria durante el mezclado. Es este el método más eficiente, más simple y más viable tecnológicamente y económicamente, de acuerdo con los autores.

Por otro lado, se tienen los métodos indirectos, que son variados y son principalmente:

- Redes vasculares controladas dentro del concreto (con una función similar a la del hueso humano), su diseño permite suplementar a la bacteria con nutrientes posterior a la inoculación y aún tiempo después de instituido el concreto bacteriano;
- Encapsulación, que consiste en recubrir a las bacterias con algún material de protección para garantizar la supervivencia de la bacteria en condiciones adversas, sin embargo, presenta ciertas desventajas notorias, ya que el material de recubrimiento debe ser químicamente compatible con la matriz cementante y debe soportar los esfuerzos mecánicos internos durante el fraguado.
- De protección, consiste en materiales adicionales a los nutrientes que son inoculados en conjunto con la bacteria para garantizar su supervivencia, pero es más económica que la encapsulación, su desventaja consiste en que, dependiendo del material, puede afectar negativamente el desempeño del concreto en cuestión.

Las diferencias entre un método de inoculación y otro permiten que exista una amplia diferencia entre el costo de elaboración de concretos bacterianos de un país a otro, dependiendo fuertemente de la disponibilidad de los materiales, la mano de obra especializada y las restricciones tecnológicas presentes.

6.4. Dirección para futuras investigaciones

Uno de los factores más notorios en la literatura es el aumento en el corto plazo de la resistencia del concreto, pero sin duda el más relevante es el aumento a largo plazo (de forma gradual), ya que este fenómeno sucede siempre que se presente una fisura y el dióxido de carbono tenga contacto con los sitios de nucleación de las bacterias y estas abandonen su estado de hibernación. De este modo, la literatura confirma la inclusión de bacterias como un medio para la reparación *in-situ* del concreto, un concreto bacteriano es entonces una alternativa sostenible debido a sus propiedades autógenas y reactivas.

Grosso modo la literatura sugiere que la implementación de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* tiene un amplio número de efectos positivos en el concreto: incremento aproximado del 22% en la resistencia a la compresión (Chahal et al., 2012; Jena et al., 2021; Nguyen et al., 2019), un aumento en la densidad del mismo (debido a la precipitación de calcita en el interior y superficie) (Chen et al., 2020; Jena et al., 2021), un incremento en la resistencia a la corrosión y a la carbonatación y un efecto gradual de autorreparación (Bisht et al., 2020; K. Li et al., 2019; Nosouhian et al., 2016) y los efectos positivos de que se reportan en esta investigación.

Sin embargo, en opinión de algunos autores (Amer Algaifi et al., 2020; Andalib et al., 2016; Jena et al., 2021; Rahaman et al., 2020), no existe aún un consenso general sobre la fiabilidad de las bacterias en los concretos por lo que sugieren investigaciones con un enfoque particular en los siguientes temas, destacando la escasez de estudios en los mismos: métodos de inoculación de la bacteria, análisis microestructural detallado que permita identificar los obstáculos que enfrenta la bioprecipitación a nivel micro, estudios que hagan énfasis en los efectos de distintos tipos de concentraciones, efectos de temperaturas extremas en el comportamiento de las bacterias, efectos de la bacteria en concretos con agregados reciclados y la viabilidad económica de la técnica en contraste con otras técnicas convencionales.

De igual modo, la literatura también destaca la escasez de estudios con énfasis en el análisis costo-beneficio de la inclusión de dichas bacterias; los agentes

precursores del aumento en la formación de productos de hidratación; de los efectos concomitantes que suceden en el núcleo del concreto; el comportamiento de las bacterias en ambientes agresivos como en sitios de deposición industrial, infraestructura proclive al congelamiento u obras submarinas, *inter alia* (Jakubovskis et al., 2020).

Cuando se aborda el tema desde la perspectiva de concretos con agregados reciclados se reduce aún más la cantidad de trabajos que consideren las bacterias como una alternativa para el mejoramiento de sus propiedades (Joshi et al., 2020; Kapoor & Bohroo, 2019; Tam et al., 2021).

Por otro lado, autores como García-González et al. (2020); Jakubovskis et al. (2020); Joshi et al. (2020); Nguyen et al. (2019) y Singh et al. (2020) consideran viable y hasta favorable la inclusión de bacterias en el concreto como una alternativa sostenible ambientalmente y que debido a sus propiedades autógenas y su respectivo aumento en la durabilidad de los mismos puede derivar en un descuento o un “premium” en el costo del concreto bacteriano. Dichos autores consideran que es posible que con un aumento significativo en la investigación respecto a los aspectos más urgentes del concreto bacteriano (el establecimiento de un estándar sobre la concentración de bacterias, de la inoculación de la misma y la economización de los métodos de producción), la adición de bacterias al concreto se pueda postular como una alternativa prometedora y promover su incursión en la industria de la construcción como una técnica que se coloque a la par de otras técnicas utilizadas comúnmente para el mejoramiento del concreto.

7. Conclusiones

Es así que, con base en los resultados obtenidos en las pruebas de carbonatación, el análisis, así como la revisión de la literatura sobre concreto bacteriano, concreto reciclado, exposición natural y carbonatación, se pueden formular las siguientes conclusiones más relevantes con respecto a las propiedades mecánicas, las propiedades de durabilidad, el mecanismo de auto-curado y otros aspectos relevantes que proporcionan una dirección para las futuras investigaciones:

1. En la presente investigación se ha determinado que al aumentar la concentración de bacteria en las mezclas de concreto aumentan también la resistencia a la carbonatación, la redensificación y el tiempo de servicio estimado, mejorando la durabilidad de los concretos, tanto naturales como reciclados.
2. De los resultados analizados en esta investigación los concretos 0.5 CAR con una concentración del 1% de la bacteria fueron los que mejores resultados obtuvieron en comparación con sus especímenes de referencia, un incremento del 32% en la resistencia a la carbonatación, enfatizando la adición de bacteria para el mejoramiento del concreto con agregado reciclado.
3. En concordancia con lo expuesto en la literatura, la técnica de inoculación directa ha demostrado funcionar de la manera esperada, propiciando la actividad bacteriana, confirmando a través de los resultados su eficiencia como método de adición.
4. En la presente investigación se obtuvo un aumento de hasta 32% en la resistencia a la carbonatación en especímenes con agregado reciclado y 1.0% de concentración de bacteria (familia 0.5 CAR/1.0% B), así como un aumento desde 2 hasta 50 años estimados de servicio. En la literatura se ha obtenido disminución de la porosidad de 50%, disminución de la permeabilidad de 32%, una disminución de hasta 68% de la absorción y un notable incremento en la resistencia al ingreso de agentes contaminantes, tanto al carbono (CO_2) como a los iones cloruro. Es necesario realizar investigaciones enfocadas a los procesos que suceden al interior del concreto bacteriano en el corto y largo plazo, para determinar con exactitud aquellos que intervienen durante la bioprecipitación.
5. El precio de la adición de bacterias al concreto es mayor al concreto convencional (la literatura menciona un incremento entre 50% y 100%), sin embargo, sus propiedades permiten la mejora del mismo a corto y largo plazo. Estas se consideran un “valor agregado” (“premium”) directamente relacionado con su desempeño, además de representar un descuento en

obras de rehabilitación y reparación (debido también al tiempo de actividad de las bacterias dentro del concreto), máxime cuando se utiliza para mejorar concretos con sustituciones parciales o totales del cemento por productos de desechos industriales o sustituciones de agregados reciclados.

6. Es menester realizar más investigación no-esterilizada (como la presente), es decir, en condiciones naturales y no de laboratorio, dado que la adición de bacterias al concreto ha alcanzado etapas avanzadas de investigación en laboratorio, donde sucede una parte importante del proceso de incubación e inoculación. Es importante dar el siguiente paso importante orientado a la adopción de esta técnica en la industria de la construcción, a través de estudios enfocados en el costo/beneficio de la aplicación de la bacteria en situaciones reales, y en escenarios desfavorables convencionales como pueden ser ambientes marinos, ciclos de congelamiento, depósitos de desechos industriales y cargas sostenidas durante largos periodos de tiempo, *inter alia*.
7. De manera sucinta, a la fecha no existe un consenso o estándar sobre la especie de bacteria ni la concentración adecuada que permita elaborar concretos bacterianos con resultados esperados *ex ante* y comparables *ex post* a un patrón conocido. La literatura ha favorecido dos especies diferentes de bacterias que han arrojado resultados positivos: *Sporosarcina pasteurii* y *B. Sphaericus*, sin embargo, dichos resultados positivos son mixtos y no se encuentran uniformemente relacionados con las concentraciones, aunque se distingue un patrón notable: a mayores concentraciones, mayores beneficios. Por otro lado, algunas pocas investigaciones no han podido confirmar la actividad bacteriana ni el sellado de fisuras en la superficie del concreto. Por su parte, la presente investigación ha confirmado que un aumento en la concentración de bacteria corresponde a un aumento en las características de durabilidad de los concretos.
8. La encapsulación de bacterias para su inoculación en el concreto resulta en una mejora marginal en la supervivencia de la bacteria, sin embargo,

también dificulta la adopción de la técnica en un ámbito natural en la industria de la construcción dado que requiere equipo de laboratorio de alto nivel, incrementando los costos y dificultando su aplicación fuera de un ambiente controlado. En la literatura los resultados con respecto a la encapsulación son mixtos, predominantemente se favorece la adición directa y en algunos otros casos la indirecta. En esta investigación los efectos positivos de la bacteria fueron evidentes a través de un método de adición directa no-esterilizada.

9. Actualmente es inviable la sustitución total de agregados naturales por agregados reciclados (para obtener concretos sostenibles) sin algún tipo de tratamiento previo, esto debido a sus altos valores de absorción y porosidad. Esta investigación enfatiza la necesidad de aumentar la investigación en concretos con altas relaciones de a/c, como es el caso de los concretos de estudio 0.7 a/c, donde se obtuvieron los resultados más desfavorables que, a su vez, podrían verse beneficiados de una mayor concentración de bacteria. La literatura también refiere a otras líneas de investigación que permitan subsanar las principales dificultades de implementar los agregados reciclados en la industria de la construcción, tales como una alta absorción, alta porosidad y la presencia de mortero de concretos anteriores. La adición de bacterias a los concretos reciclados es una técnica que ha tenido resultados favorecedores en la presente investigación y en la literatura (tanto directamente como tratamiento de agregados reciclados como adición al concreto reciclado), por lo que se postula como una alternativa de tratamiento para la inclusión futura de estos residuos de la construcción a la industria.

8. Referencias

- Abo-El-Enein, S. A., Ali, A. H., Talkhan, F. N., & Abdel-Gawwad, H. A. (2013). Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of cement mortar. *HBRC Journal*, 9(1), 36–40. <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2012.10.004>
- Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2011). Effect of calcifying bacteria on permeation properties of concrete structures. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 38(9), 1229–1234. <https://doi.org/10.1007/s10295-010-0901-8>
- Achal, V., Mukherjee, A., & Reddy, M. S. (2011). Microbial concrete: Way to enhance the durability of building structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23(6), 730–734. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000159](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000159)
- ACI 318S-14. (2014). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (Versión en Español). American Concrete Institute. Farmington Hills, Mich., U.S.A.
- ACI Committee 555. (2001). *Removal and Reuse of Hardened Concrete - ACI 555-01*. 1–26.
- Al-Bayati, H. K. A., Das, P. K., Tighe, S. L., & Baaj, H. (2016). Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 112, 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.176>
- Al-Qaraghuli, H., Alsayed, Y., & Almoghazy, A. (2017). Postwar City: Importance of Recycling Construction and Demolition Waste. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(8). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/8/082062>
- Amer Algaifi, H., Abu Bakar, S., Rahman Mohd. Sam, A., Ismail, M., Razin Zainal Abidin, A., Shahir, S., & Ali Hamood Altowayti, W. (2020). Insight into the role of microbial calcium carbonate and the factors involved in self-healing concrete. *Construction and Building Materials*, 254, 119258. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119258>
- Andalib, R., Abd Majid, M. Z., Hussin, M. W., Ponraj, M., Keyvanfar, A., Mirza, J., & Lee, H. S. (2016). Optimum concentration of *Bacillus megaterium* for strengthening structural concrete. *Construction and Building Materials*, 118, 180–193. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.142>
- Andrade, C. (1988). Manual de Inspección de Obras Dañadas por Corrosión de Armaduras. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 1, Issue 1). Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción.

- Arroyo Morocho, F. R. (2018). La Economía Circular Como Factor De Desarrollo Sustentable Del Sector Productivo. *INNOVA Research Journal*, 3(12), 78–98. <https://doi.org/10.33890/innova.v3.n12.2018.786>
- Bai, G., Zhu, C., Liu, C., & Liu, B. (2020). An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 240, 117978. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117978>
- Bergh, J. M. van der, Miljević, B., Šovljanski, O., Vučetić, S., Markov, S., Ranogajec, J., & Bras, A. (2020). Preliminary approach to bio-based surface healing of structural repair cement mortars. *Construction and Building Materials*, 248(x). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118557>
- Bhutange, S. P., Latkar, M. V., & Chakrabarti, T. (2019). Role of biocementation to improve mechanical properties of mortar. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 44(2). <https://doi.org/10.1007/s12046-018-1023-7>
- Bisht, V., Chaurasia, L., & Singh, L. P. (2020). Studies on corrosion and carbonation resistance by bacteria-mediated mineralization in concrete. *ACI Materials Journal*, 117(4), 13–26. <https://doi.org/10.14359/51724610>
- Boquet, E.; Boronat, A.; Ramos-Cormenzana, A. (1973). Production of Calcite (Calcium Carbonate) Crystals by Soil Bacteria is a General Phenomenon. *Nat. Phys. Sci.*, 241, 20.
- Campos-Silva, A.R.; Fajardo, G.; Mendoza-Rangel, J. M. (2016). Study of Carbonation Behavior in Reinforced Concrete in Natural and Accelerated Conditions. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 8(81), 14–34.
- CANACEM; INEGI, 2019. *Cemento y productos a base de cemento*, s.l.: CANACEM.
- Cardoso, R., Pedreira, R., Duarte, S., Monteiro, G., Borges, H., & Flores-Colen, I. (2016). *Biocementation as Rehabilitation Technique of Porous Materials*. 99–120. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0648-7_5
- Carević, V., Ignjatović, I., & Dragaš, J. (2019). Model for practical carbonation depth prediction for high volume fly ash concrete and recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 213, 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.267>
- CCANZ. (2011). TR 14: Best Practice Guide for the use of Recycled Aggregates in New Concrete Recycled Aggregates in New Concrete. In *CCANZ Production*.
- Chahal, N., Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of fly

- ash concrete. *Construction and Building Materials*, 28(1), 351–356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.042>
- Chen, H. J., Chen, M. C., & Tang, C. W. (2020). Research on improving concrete durability by biomineralization technology. *Sustainability (Switzerland)*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/su12031242>
- CMIC; Romero Pérez, A. (2005). Plan de Manejo de Residuos de la Construcción y la Demolición. *Instituto Tecnológico De La Construcción*, 109. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/190015/Plan_de_Manejo_de_Residuos_de_la_Construccion_y_la_Demolicion_de_la_CMIC.pdf
- Comisión Permanente del Hormigón. (2008). Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008. *Boe Nº 203*, 704.
- Cuzman, O. A., Rescic, S., Richter, K., Wittig, L., & Tiano, P. (2015). Sporosarcina pasteurii use in extreme alkaline conditions for recycling solid industrial wastes. *Journal of Biotechnology*, 214, 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.09.011>
- De Belie, N. (2016). Application of bacteria in concrete: a critical evaluation of the current status. *RILEM Technical Letters*, 1, 56. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.14>
- De Muynck, W., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review. *Ecological Engineering*, 36(2), 118–136. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.02.006>
- Domínguez, L., & Martínez, E. (2007). Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas Reintegration of construction and demolition waste to the life cycle of housing construction. *Ingenieria*, 11, 43–54. <http://www.redalyc.org/html/467/46711305/>
- Durga, C. S. S., & Ruben, N. (2019). A review of the mechanical behavior of substitution materials in self-healing concrete. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 25). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-3317-0_12
- Farah, M., Grondin, F., Guo, M., Loukili, A., & Rozière, E. (2019). Carbonation of Concrete in a Climate Change Context. *Risk Evaluation and Climate Change Adaptation of Civil Engineering Infrastructures and Buildings*, 85–104. <https://doi.org/10.1002/9781119671428.ch3>
- Feng, Z., Zhao, Y., Zeng, W., Lu, Z., & Shah, S. P. (2020). Using microbial carbonate precipitation to improve the properties of recycled fine aggregate and mortar.

Construction and Building Materials, 230, 116949.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116949>

García-González, J., Pereira, A. S., Lemos, P. C., Almeida, N., Silva, V., Candeias, A., Juan-Valdés, A., & Faria, P. (2020). Effect of surface biotreatments on construction materials. *Construction and Building Materials*, 241.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118019>

García-González, J., Rodríguez-Robles, D., De Belie, N., Morán-del Pozo, J. M., Guerra-Romero, M. I., & Juan-Valdés, A. (2020). Self-healing concrete with recycled aggregates. In *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819055-5.00018-8>

Ghahari, S. A., Ramezani pour, A. M., Ramezani pour, A. A., & Esmaeili, M. (2016). An Accelerated Test Method of Simultaneous Carbonation and Chloride Ion Ingress: Durability of Silica Fume Concrete in Severe Environments. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(1).
<https://doi.org/10.1155/2016/1650979>

Grabiec, A. M., Klama, J., Zawal, D., & Krupa, D. (2012). Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition. *Construction and Building Materials*, 34, 145–150.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.027>

Graham, S. (2004). Introduction: Confronting Place Annihilation in Urban Research. *City Analysis of Urban Trends, Culture, Theory, Policy, Action*, 8(2), 165–196.

Hansen, T. C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985. *Materials and Structures*, 19(3), 201–246. <https://doi.org/10.1007/BF02472036>

Hays, G. (2010). Now is the Time. *World Corrosion Organization*, 1(1), 1–2.
<https://doi.org/10.1002/sres.3850030207>

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. d. P. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGraw Hill Education.

Herrera-Borja, J. (2006). *Inspección Estructural del Puente “El Zacatal.”* Instituto Politécnico Nacional: Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura.

INEGI, 2013. *Estadísticas a propósito de la industria del Cemento*, s.l.: s.n.

IPCC. (2018). IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C. In *IPCC - Sr15*.
https://report.ipcc.ch/sr15/pdf/sr15_spm_final.pdf%0Ahttp://www.ipcc.ch/report/sr15/

- Ivanov, V., Chu, J., & Stabnikov, V. (2015). Basics of Construction Microbial Biotechnology. In *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4>
- Ivanov, V., & Stabnikov, V. (2017). *Optimization and Design of Construction Biotechnology Processes*. 5, 235–260. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1445-1_12
- Ivanov, V., & Stabnikov, V. (2017). *Biocementation and Biocements*. 109–138. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1445-1_7
- Jain, S., & Arnepalli, D. N. (2019). Biomineralisation as a remediation technique: A critical review. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 16). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-0899-4_19
- Jakubovskis, R., Jankutė, A., Urbonavičius, J., & Gribniak, V. (2020). Analysis of mechanical performance and durability of self-healing biological concrete. *Construction and Building Materials*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119822>
- Jena, S., Basa, B., & Panda, K. C. (2021). Bacterial Concrete for the Development of Sustainable Construction - A Review. Springer Nature Singapore Pte Ltd 2021, 77(1), 587–600. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5195-6_46
- Jiang, Z., Li, W., & Yuan, Z. (2015). Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 57, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.014>
- Jiménez, L. F., & Moreno, E. (2015). Carbonatación acelerada en concretos con agregados reciclados de alta absorción. *Conpat-Conferencia Patológica, September 2015*, 8. https://www.researchgate.net/publication/303920864_CARBONATACION_ACCELERADA_EN_CONCRETOS_CON_AGREGADOS_RECICLADOS_DE_ALTA_ABSORCION
- Jiménez, L. F., Domínguez, J. A., & Vega-Azamar, R. E. (2018). Carbon footprint of recycled aggregate concrete. *Advances in Civil Engineering, 2018*. <https://doi.org/10.1155/2018/7949741>
- Jimenez, L. F., & Domínguez, J. A. (2008). *Comportamiento de especímenes de concreto reciclado ante la acción acelerada de cargas ambientales*. 3–14. https://administracionytecnologiaparaeldiseno.azc.uam.mx/publicaciones/memorias_cong2008/4.pdf

- Joshi, S., Goyal, S., & Sudhakara Reddy, M. (2020). Influence of biogenic treatment in improving the durability properties of waste amended concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 263, 120170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120170>
- Kadapure, S. A., Kulkarni, G. S., & Prakash, K. B. (2019). Study on properties of bacteria-embedded fly ash concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(5), 627–636. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00127-z>
- Kapoor, K., & Bohroo, A. U. R. (2019). Study on the Influence of Attached Mortar Content on the Properties of Recycled Concrete Aggregate. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 30). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-6717-5_33
- Kaur, N. P., Majhi, S., Dharni, N. K., & Mukherjee, A. (2020). Healing fine cracks in concrete with bacterial cement for an advanced non-destructive monitoring. *Construction and Building Materials*, 242, 118151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118151>
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., & Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721–740. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- Koch, G. H., Brongers, M. P. H., Thompson, Y. P., & Vlrmani, J. H. (2002). International Cost of Corrosion Study Unveiled (NACE International). *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the US.*, 1(July), 20.
- Lee, J. C., Lee, C. J., Chun, W. Y., Kim, W. J., & Chung, C. W. (2015). Effect of microorganism *Sporosarcina pasteurii* on the hydration of cement paste. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 25(8), 1328–1338. <https://doi.org/10.4014/jmb.1411.11037>
- Leemann, A., & Loser, R. (2019). Carbonation resistance of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 204, 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.162>
- Li, K., Zhao, F., & Zhang, Y. (2019). Influence of carbonation on the chloride ingress into concrete: Theoretical analysis and application to durability design. *Cement and Concrete Research*, 123(June), 105788. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105788>
- Li, P., & Qu, W. (2015). Bacteria for Concrete Surface Treatment. In *Biotechnologies and Biomimetics for Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09287-4>

- Lovato, P. S., Possan, E., Molin, D. C. C. D., Masuero, Â. B., & Ribeiro, J. L. D. (2012). Modeling of mechanical properties and durability of recycled aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 26(1), 437–447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.043>
- Malheiro, R., Camões, A., Ferreira, R. M., Meira, G., Amorim, T., & Rei, R. (2015). Carbonation front progress in mortars containing fly ash considering the presence of chloride ions. *Key Engineering Materials*, 634, 214–221. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.634.214>
- Mao, M., Zhang, D., Yang, Q., & Zhang, W. (2019). Study of Durability of Concrete with Fly Ash as Fine Aggregate under Alternative Interactions of Freeze-Thaw and Carbonation. *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/4693893>
- Maqbool, S., & Singh, K. (2019). Effect of bacterial encapsulation in concrete: A review on applications and effects. *Materials Today: Proceedings*, 33(xxxx), 1713–1719. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.541>
- Marín, S., Cabestrero, O., Demergasso, C., Olivares, S., Zetola, V., & Vera, M. (2021). An indigenous bacterium with enhanced performance of microbially-induced Ca-carbonate biomineralization under extreme alkaline conditions for concrete and soil-improvement industries. *Acta Biomaterialia*, 120, 304–317. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.11.016>
- Maurya, K. K., Sonker, T., & Rawat, A. (2020). Sustainable concrete construction by microorganism and monitoring using EMI technique: A review. *Materials Today: Proceedings*, 32(xxxx), 670–676. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.169>
- Menéndez Rodríguez, M., 2019. Puente NO será reparado. *POR ESTO*, 27 Febrero.
- Meyer, C. (2009). The greening of the concrete industry. *Cement and Concrete Composites*, 31(8), 601–605. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.12.010>
- Mondal, S., & (Dey) Ghosh, A. (2018). Microbial Concrete as a Sustainable Option for Infrastructural Development in Emerging Economies. *Urbanization Challenges in Emerging Economies (ASCE)*, 413–423.
- Mondal, S., & (Dey) Ghosh, A. (2019). Review on microbial induced calcite precipitation mechanisms leading to bacterial selection for microbial concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 67–75. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.122>

- Moreno, E. I., Lara, G. G. D., Sarabia, E. J. C., & Gómez, F. D. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería*, 8(2), 117–130.
- Moreno, E. I. (2006). Determinación del pH de la solución de los poros de concreto después de un proceso acelerado de carbonatación. *Ingeniería*, 10(3), 5–12.
- Moreno, E. I. (2010). Discussion of “sources of variations when comparing concrete carbonation results” by F. G. da Silva, P. Helene, P. Castro-Borges, and J. B. L. Liborio. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(7), 758. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000075](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000075)
- Moreno, E. I. (2013). Carbonation coefficients from concrete made with high-absorption limestone aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/734031>
- Moreno, E. I., Lara, G. G. D., Sarabia, E. J. C., & Gómez, F. D. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería*, 8(2), 117–130.
- Nguyen, T. H., Ghorbel, E., Fares, H., & Cousture, A. (2019). Bacterial self-healing of concrete and durability assessment. *Cement and Concrete Composites*, 104(May), 103340. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103340>
- Nixon, P. J. (1978). Recycled concrete as an aggregate for concrete—a review. *Matériaux et Constructions*, 11(5), 371–378. <https://doi.org/10.1007/BF02473878>
- Nosouhian, F., Mostofinejad, D., & Hasheminejad, H. (2016). Concrete Durability improvement in a sulfate environment using bacteria. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1), 1–12. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001337](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001337)
- Omoriegbe, A. I., Ngu, L. H., Ong, D. E. L., & Nissom, P. M. (2019). Low-cost cultivation of *Sporosarcina pasteurii* strain in food-grade yeast extract medium for microbially induced carbonate precipitation (MICP) application. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 17, 247–255. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2018.11.030>
- Ouyang, K., Shi, C., Chu, H., Guo, H., Song, B., Ding, Y., Guan, X., Zhu, J., Zhang, H., Wang, Y., & Zheng, J. (2020). An overview on the efficiency of different pretreatment techniques for recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121264. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121264>
- Pachaivannan, P., Hariharasudhan, C., Mohanasundram, M., & Anitha Bhavani, M. (2020). Experimental analysis of self healing properties of bacterial concrete.

Materials Today: Proceedings, 33(xxxx), 3148–3154.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.782>

- Papadakis, V. G., Fardis, M. N., & Vayenas, C. G. (1992). Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and Structures*, 25(5), 293–304. <https://doi.org/10.1007/BF02472670>
- Parrott, L. J. (1990). Damage caused by carbonation of reinforced concrete. *RILEM Technical Committees*, 104-DCC, 230–234.
- Peng, C. (2016). Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *Journal of Cleaner Production*, 112, 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.078>
- Qiu, J., Tng, D. Q. S., & Yang, E. H. (2014). Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation. *Construction and Building Materials*, 57, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.085>
- Rahaman, S., Ray Dutta, J., Kar, A., & Bandyopadhyay, M. (2020). Investigating the Growth of Microbial Colonies in Cement Paste to Aid in Concrete Repair. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 46(1), 247–256. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26365-2_57
- Ramachandran, S. K., Ramakrishnan, V., & Bang, S. S. (2001). Remediation of Concrete Using Microorganisms. *ACI Materials Journal*, 98, 3–9. <https://doi.org/10.14359/10154>
- Ramezaniapour, A. A., Ghahari, S. A., & Esmaeili, M. (2014). Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 58, 138–146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.102>
- Ravindrarajah RS, T. T. (1985). Properties of concrete made with crushed concrete as aggregates. *Magazine of Concrete Research*, 130(37), 29–38. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003808061300108X>
- Reinhardt, H. W., Jonkers, H., Van Tittelboom, K., Snoeck, D., De Belie, N., De Muynck, W., Verstraete, W., Wang, J., & Mechtcherine, V. (2013). Recovery against environmental action. In *RILEM State-of-the-Art Reports* (Vol. 11). https://doi.org/10.1007/978-94-007-6624-2_3
- RILEM. (1988). CPC-18 measurement of hardened concrete carbonation depth. *Materiaux et Constructions*, 21(126), 453–455.
- Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P., & Ferrara, L. (2015). Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction*

and Building Materials, 86, 1–11.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.091>

Rong, H., Wei, G., Ma, G., Zhang, Y., Zheng, X., Zhang, L., & Xu, R. (2020). Influence of bacterial concentration on crack self-healing of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 244, 118372. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118372>

Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete - A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060–2071. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>

Sanjuán, M. A., Andrade, C., & Cheyrezy, M. (2003). Concrete carbonation tests in natural and accelerated conditions. *Advances in Cement Research*, 15(4), 171–180. <https://doi.org/10.1680/adcr.2003.15.4.171>

Saridhe, S. P., & Selvaraj, T. (2021). Microbial precipitation of calcium carbonate in cementitious materials – A critical review. *Materials Today: Proceedings*, 43(xxxx), 1232–1240. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.762>

Scrivener, K. L., Crumbie, A. K., & Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4), 411–421. <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>

Scrivener, K. L., & Kirkpatrick, R. J. (2008). Innovation in use and research on cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 128–136. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025>

SE. (2013). *ESTUDIO DE LA CADENA PRODUCTIVA DE LOS MATERIALES PÉTREOS: Documento de análisis*. https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/cadena_productiva_materiales_petreos.pdf

SEDATU. (2018). *Programa de Desarrollo Urbano de Chetumal-Calderitas-Subteniente López-Huay Pix*.

Shi, C., Li, Y., Zhang, J., Li, W., Chong, L., & Xie, Z. (2016). Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 466–472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>

Singh, P., Kaur, I., & Singh, N. (2020). A review of different bacteria carriers used in self-healing mechanism. *Materials Today: Proceedings*, 32(xxxx), 955–960. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.100>

- Stocks-Fischer, S., Galinat, J. K., & Bang, S. S. (1999). Microbiological precipitation of CaCO₃. *Soil Biology and Biochemistry*, 31(11), 1563–1571. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00082-6](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00082-6)
- Suleiman, A. R., Nelson, A. J., & Nehdi, M. L. (2019). Visualization and quantification of crack self-healing in cement-based materials incorporating different minerals. *Cement and Concrete Composites*, 103 (October 2018), 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.026>
- Sun, X., & Miao, L. (2019). The Comparison of Microbiologically-Induced Calcium Carbonate Precipitation and Magnesium Precipitation. *Proceedings of the 8th International Congress on Environmental Geotechnics Volume 3 Towards a Sustainable Geoenvironment*, 3(1), 302–308. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2227-3_37
- Sun, X., Miao, L., Tong, T., & Wang, C. (2019). Study of the effect of temperature on microbially induced carbonate precipitation. *Acta Geotechnica*, 14(3), 627–638. <https://doi.org/10.1007/s11440-018-0758-y>
- Tam, V. W. Y., Wattage, H., Le, K. N., Buteraa, A., & Soomro, M. (2021). Methods to improve microstructural properties of recycled concrete aggregate: A critical review. *Construction and Building Materials*, 270(xxxx), 121490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121490>
- Titus, D., James Jebaseelan Samuel, E., & Roopan, S. M. (2019). Nanoparticle characterization techniques. In *Green Synthesis, Characterization and Applications of Nanoparticles*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102579-6.00012-5>
- Trocónis, O. (2000). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. In *RED DURAR*.
- Ulloa, E. C., López, P., Trujeque, R., & Pérez, C. (2010). Carbonatación de concreto en atmósfera natural y cámara de carbonatación acelerada Redalyc Sistema de Información Científica Francisco ; Osorno Carrillo , José B . Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Cuba. *Revista CENIC. Ciencias Químicas*, January.
- UNCED. (1993). *Agenda 21 : programme of action for sustainable development, Rio Declaration on Environment and Development, statement of forest principles : the final text of agreements negotiated by Governments at the United Nations Conference on Environment and Develo.* 294 p. <http://digitallibrary.un.org/record/170126>
- United Nations Environment Program (UNEP). (2014). *Sand, rarer than one thinks. United Nations Environment Program (UNEP).* 2012(March), 1–15.

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8665/GEAS_Mar2014_Sand_Mining.pdf?sequence=3&isAllowed=y

- Vidaud, E. (2012). La carbonatación en el concreto reforzado (Primera Parte). *Revista CYTC*, 20–23.
- Vidaud, E. (2012). La Carbonatación en el concreto reforzado (Segunda Parte). *Revista CYTC*, 20–23.
- 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>
- von Greve-Dierfeld, S., Lothenbach, B., Vollpracht, A., Wu, B., Huet, B., Andrade, C., Medina, C., Thiel, C., Gruyaert, E., Vanoutrive, H., Saéz del Bosque, I. F., Ignjatovic, I., Elsen, J., Provis, J. L., Scrivener, K., Thienel, K. C., Sideris, K., Zajac, M., Alderete, N., ... De Belie, N. (2020). Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. In *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* (Vol. 53, Issue 6). <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>
- Wang, J., Vandevyvere, B., Vanhessche, S., Schoon, J., Boon, N., & De Belie, N. (2017). Microbial carbonate precipitation for the improvement of quality of recycled aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 156, 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.051>
- Xiao, X., Goh, L. X., Unluer, C., & Yang, E. H. (2021). Bacteria-induced internal carbonation of reactive magnesia cement. *Construction and Building Materials*, 267, 121748. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121748>
- Xu, J., & Wang, X. (2018). Self-healing of concrete cracks by use of bacteria-containing low alkali cementitious material. *Construction and Building Materials*, 167, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.020>
- Yatish Reddy, P. V., Ramesh, B., & Prem Kumar, L. (2020). Influence of bacteria in self healing of concrete - a review. *Materials Today: Proceedings*, 33(xxxx), 4212–4218. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.233>
- Yoon, I. S. (2007). Deterioration of Concrete Due to Combined Reaction of Carbonation and Chloride Penetration: Experimental Study. *Key Engineering Materials*, 348–349, 729–732. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.348-349.729>
- Zhang, W., Zheng, Q., Ashour, A., & Han, B. (2020). Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review. *Composites Part B*:

Engineering, 189(February),
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107892>

107892.