



Nuevas prestaciones de los hormigones actuales en la construcción arquitectónica.

Autor: Antonio Merino Pitarch
Titulación: Grado en Fundamentos de la arquitectura
Tutores: José María Vercher Sanchis,
María Juana Soriano Cubells

TFG

Resumen

Este trabajo presenta una recopilación de nuevas prestaciones del hormigón desarrolladas en diferentes trabajos de investigación enumeradas a continuación. Se ha incluido un hormigón con capacidad autorreparadora de pequeñas fisuras internas y externas gracias a la acción de agentes biológicos. Un hormigón fotocatalítico que, además de ser descontaminante por estar compuesto por cemento geopolímero, adquiere la capacidad de autolimpiarse gracias a la acción del dióxido de titanio. Un hormigón biológico sobre el cual puede crecer determinadas especies vegetales. Un hormigón mucho más flexible gracias a la incorporación de unas micro fibras que permiten que se fisure a una escala microscópica sin comprometer sus capacidades mecánicas. Por último, un hormigón ecológico que reduce la cantidad de emisiones que se producen durante su fabricación así como un sistema antisísmico para prevenir daños ocasionados entre una estructura de hormigón y la tabiquería interior a causa de movimientos sísmicos mediante la modificación de la matriz del hormigón.

Palabras clave:

Hormigón biológico, hormigón fotocatalítico, hormigón autorreparable, dióxido de titanio, carbonato cálcico, fosfato de magnesio.

Abstract

This study offers the compilation of new concrete features developed in different research projects that are mentioned as follows. It includes a self-healing concrete with the ability to repair internal and external small cracks by the action of biological agents. A photocatalytic concrete that besides being decontaminant, as it is composed of the geopolymer concrete, gains the ability to be self-clean by the action of titanium dioxide. A biological concrete on which some vegetables can grow. A flexible concrete thanks to the addition of microfibers that allow it to crack at a microscopic scale without compromising its mechanical capabilities. Finally, an ecological concrete that reduces the amount of emissions generated during production as well as a seismic-resistant system to prevent damages between the concrete structure and the internal partitions by modifying the concrete matrix.

Keywords:

Bio-concrete, photocatalytic concrete, self-healing concrete, titanium dioxide, calcium carbonate, magnesium phosphate.

Resum

En aquest treball s'ha realitzat una recopilació de noves prestacions del formigó desenvolupades en diferents treballs d'investigació. S'ha inclòs un formigó amb capacitat d'autorreparar xicotetes fissures internes i externes gràcies a l'acció d'agents biològics; un formigó fotocatalític que a més de ser descontaminant per estar compost per ciment geopolimèric adquireix la capacitat d'autonetejar-se gràcies a l'acció del diòxid de titani; un formigó biològic sobre el qual pot créixer unes determinades espècies vegetals; un formigó molt més flexible gràcies a la incorporació d'unes micro fibres que permeteixen que es fisure a una escala microscòpica sense comprometre les seues capacitats mecàniques; un formigó ecològic que reduïx la quantitat d'emissions que es produïxen durant la seua fabricació; i un sistema per a previndre danys ocasionats entre una estructura de formigó i els envans interior a causa de moviments sísmics per mitjà de la modificació de la matriu del formigó.

Paraules clau:

Formigó biològic, formigó fotocatalític, formigó autoreparador, diòxid de titani, carbonat càlcic, fosfat de magnesi.

Tabla de contenidos

Introducción.

Metodología y objetivos.

- 1.** Hormigón autorreparable.
 - 1.1.** Introducción.
 - 1.2.** Tratamientos pasivos y tratamientos activos.
 - 1.2.1.** La reparación autógena.
 - 1.2.2.** Encapsulación de un material polimérico.
 - 1.2.3.** Producción microbiana de carbonato cálcico.
 - 1.3.** Precipitación de carbonato cálcico.
 - 1.3.1.** Vía autótrofa.
 - 1.3.2.** Vía heterótrofa.
 - 1.4.** Integración de los microorganismos en la matriz del hormigón.
 - 1.5.** Conclusiones.
- 2.** Hormigón fotocatalítico o descontaminante.
 - 2.1.** Introducción.
 - 2.2.** Aproximación a la auto-limpieza.
 - 2.3.1.** Papel de las nanopartículas de dióxido de titanio en el mecanismo de auto-limpieza.
 - 2.3.** Métodos de preparación del hormigón descontaminante.
 - 2.4.** Importancia de la auto-limpieza.
 - 2.5.** Producto comercial y ejemplo práctico de uso del hormigón descontaminante.
 - 2.5.1.** Ventajas que ofrece ecoGranic frente a otros pavimentos similares.
 - 2.5.2.** Hormigón descontaminante en la ciudad de Valencia.
 - 2.6.** Conclusiones.
- 3.** Hormigón biológico.
 - 3.1.** Introducción.
 - 3.2.** Concepto de biorreceptividad.

- 3.3.** Materiales y métodos.
- 3.4.** Resultados relacionados con el hormigón de fosfato de magnesio (MPC).
 - 3.4.1.** pH y densidad verdadera.
 - 3.4.2.** La consistencia normal, tiempos de fraguado y estabilidad volumétrica.
 - 3.4.3.** Resistencia a compresión y retracción por secado.
- 3.5.** Conclusiones.
- 4.** Otros hormigones.
 - 4.1.** Hormigón flexible.
 - 4.2.** Hormigón ecológico.
 - 4.3.** Hormigón antisísmico.
- 5.** Índice de imágenes.
- 6.** Referencias.
- 7.** Bibliografía y enlaces web.

Introducción

Dentro del campo de los materiales para la construcción arquitectónica hay uno que quizás se erija como el material más universal: se trata del hormigón. No en vano, es el más utilizado en la construcción a nivel mundial y, según algunos estudios incluso, la segunda materia más consumida en el mundo, sólo por detrás del agua. El hormigón, o concreto, es un material compuesto y artificial, y por tanto, necesita de una serie de componentes y procesos de fabricación para poder producirlo. Está formado esencialmente por un conglomerante, que suele ser cemento (cemento Portland para más señas), al que se le añade una serie de componentes agregados, como por ejemplo, áridos (gravas o arenas). Además, se debe añadir a la mezcla, una proporción adecuada de agua para que se produzca una reacción de hidratación adecuada. Por último, se pueden agregar una serie de aditivos con el fin de lograr una serie de prestaciones específicas o una mejora de las capacidades mecánicas del hormigón.

Como se ha mencionado el hormigón es un material artificial y por tanto no se encuentra o se puede obtener de forma natural. Es un material que se ha ido desarrollando con el paso de muchos años, siglos, y que todavía se sigue investigando y desarrollando nuevas fórmulas para obtener hormigones de mejores o diferentes prestaciones. Por tanto, es complicado definir cuándo nace o cuándo se inventa el hormigón. A lo largo de la historia, se encuentran diferentes intentos de conseguir morteros o pastas que consiguiesen unir las construcciones de mampostería realizadas con pétreos o materiales arcillosos. Sin embargo, no se puede hablar de hormigón propiamente dicho. Desde los egipcios, pasando por los griegos que mezclaban compuestos de caliza calcinada con arena y agua añadiendo piedras trituradas, tejas o ladrillos rotos, hasta los romanos con el desarrollo del cemento puzolánico, han sido muchas las civilizaciones que han buscado el material definitivo que resolviese todas las necesidades. Con Jon Smeaton, en su faro del acantilado de Edystone, empieza a aparecer un hormigón compuesto por piedras unidas con un mortero de cal calcinada. Y ya en el siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker, patentan el cemento Portland, que servirá de base para desarrollar el hormigón que se conoce hoy en día. Por tanto, podemos ver que el hormigón (entiéndase el hormigón que se emplea hoy en día) es un material relativamente nuevo, como ocurre con el acero, en comparación con otros materiales de construcción como puede ser la madera, la piedra, el vidrio, etc.

Este hecho, hace que todavía quede mucho por estudiar y descubrir acerca del hormigón. Si hablamos de que el hormigón es un material nuevo,

no hace falta decir que aún son más nuevos los hormigones de alta resistencia, los hormigones de endurecimiento rápido o lento, hormigones para ambientes marinos o los hormigones de colores, el hormigón blanco y un largo etcétera de tipos de hormigón que van apareciendo de forma continuada. Conforme el mundo de la construcción va requiriendo nuevas prestaciones, surgen nuevas investigaciones que desarrollan nuevos hormigones que permitan satisfacer los retos que se plantean. Muchas veces estos retos buscan llevar al material al límite de alguna de sus capacidades mecánicas, otras veces se intenta buscar la forma de añadir alguna prestación que inicialmente el hormigón no puede satisfacer o sencillamente se intenta dotar al hormigón de una estética novedosa.

Por otra parte, conforme ha ido pasando el tiempo, ha aparecido y ha ido creciendo en la sociedad una sensibilidad por el desarrollo sostenible y ecológico. En el campo de la construcción y sobretodo la arquitectura también se ha hecho patente esta preocupación. Grandes estudios de arquitectura y arquitectos se involucran mucho a la hora de realizar sus proyectos con el fin de permitir que el impacto y la huella ecológica de sus proyectos sea la mínima posible. Y de esta forma, las investigaciones a cerca de nuevos materiales también han girado hacia nuevas fórmulas de producción más sensibles con el medio ambiente. El hormigón concretamente, es un material que es muy costoso, hablando en términos económicos y también en clave ecológica, de reciclar. Además, su producción emite una gran cantidad de gases nocivos para el medio ambiente. Todos estos factores hacen que se haya estado investigando en los últimos años hacia un modelo de producción de hormigón mucho más limpio y respetuoso con el medio ambiente.

Con todo esto, se pueden encontrar numerosos trabajos de investigación cuyo objetivo ha sido solucionar alguna de estas problemáticas. En los últimos años se ha avanzado mucho en el desarrollo de hormigones ecológicos, que emiten e incluso absorben CO₂, como se desarrollará en el trabajo. También podemos encontrar hormigones que han adquirido mediante diferentes técnicas la capacidad de autoreparar pequeñas fisuras internas o superficiales, aumentando de esta forma su durabilidad y reduciendo en gran medida el coste que supone reparar esta patología. Más allá, se ha documentado sobre un hormigón que además de estas propiedades, mediante la inclusión de unas micro fibras durante el proceso de fabricación adquiere una flexibilidad y ductilidad que hasta ahora era imposible ver en el hormigón. Y por último, un hormigón que permite la colonización por parte de algunas especies vegetales como líquenes, musgos o algas sin afectar a la durabilidad del material. Esto, además de conferirle un aspecto muy novedoso en lo que a hormigón se refiere, puede significar un paso más en lo que se refiere a fachadas vegetales.

Todo este trabajo se ha llevado a cabo mediante la búsqueda de estos nuevos trabajos de investigación, con el propósito de reunir y concentrar la información para poder tener un conocimiento más amplio de las nuevas prestaciones que los hormigones pueden ofrecer hoy en día. Se ha seleccionado dentro de los había información disponible aquellos que mejores resultados han obtenido como es el caso del cemento de fosfato de magnesio en el caso del hormigón biológico, o el hormigón fotocatalítico con dióxido de titanio para el hormigón descontaminante.

Metodología y objetivos

Mediante el siguiente trabajo se pretende ahondar en las nuevas prestaciones que los hormigones destinados a la construcción, principalmente en el campo de la arquitectura, ofrecen en la actualidad. Se trata, por tanto, de un trabajo de investigación en el que se han seguido los siguientes objetivos:

- Se ha realizado una búsqueda, clasificación y ordenación pormenorizada de la información relacionada con el comportamiento de nuevos productos de hormigón para la arquitectura.
- Se ha definido las características más relevantes de su comportamiento frente a otros materiales ya conocidos o que ofreciendo unas prestaciones similares se producen con una tecnología diferente.
- Se ha buscado un determinado comportamiento del hormigón o una nueva prestación que solucionase diferentes problemas o desafíos que se presentan en la sociedad de hoy en día.
- Para finalizar cada uno de estos nuevos productos, se ha establecido una serie de conclusiones acerca del comportamiento de los mismos.

De esta forma, para el contenido del presente trabajo se ha escogido los siguientes hormigones para estudiar en profundidad. Primero, un **hormigón autorreparable**, capaz de sanar posibles fisuras y fisuras por sí mismo. En segundo lugar, un **hormigón descontaminante** que emite una menor cantidad de gases nocivos para la atmosfera terrestre y además es capaz de limpiar su superficie de partículas existentes en el ambiente. En tercer lugar, se presenta un **hormigón biológico** que permite el crecimiento en su superficie de pequeñas especies vegetales, dotando de una estética muy peculiar a los elementos que emplean dicho material. Y por último, se hace referencia a una serie de hormigones de forma más breve y que tienen diversas prestaciones interesantes. Un **hormigón flexible** mucho más dúctil que el hormigón tradicional; un **hormigón ecológico** que a causa de una modificación en su composición a la hora de fabricarlo hace que absorba más cantidad de CO₂ que el que se genera en su fabricación; y un **bloque de hormigón antisísmico** que colabora en situaciones de movimientos sísmicos con la estructura y las fábricas gracias a una modificación en su matriz.

El trabajo se ha realizado en varias etapas:

1ª Fase: consistente en la búsqueda inicial de toda la documentación sobre diferentes hormigones avanzados para conocer el estado de la cuestión en la actualidad.

2ª Fase, se realizó una selección y clasificación de la documentación encontrada para determinar aquellos productos más interesantes para ser objeto de estudio y que a su vez tuvieran una mayor disponibilidad de documentación tanto gráfica como escrita.

3ª Fase, se realizó un estudio de cada uno de los productos anteriormente citados, profundizando en cada uno de los aspectos de su comportamiento a partir de las fuentes que se citan en la bibliografía.

1. Hormigón autorreparable.

1.1. Introducción.

El hormigón es, actualmente y desde hace tiempo, uno de los materiales de construcción más utilizados en obras de arquitectura e ingeniería civil. Se trata de un material compuesto, formado principalmente por un conglomerante, cemento en la mayoría de los casos, al que se le añade áridos, agua, adiciones y aditivos específicos. Como es sabido, el hormigón, tiene una elevada resistencia a compresión, una alta durabilidad, puede trabajar en colaboración con armaduras de acero para mejorar su resistencia a tracción, cortante, flexión, etc. Se trata además de un material ciertamente accesible y no especialmente caro, además de ser un material muy amable para realizar geometrías o volúmenes complejos.

A pesar de estas y muchas otras ventajas que presenta el hormigón, es remarcable la tendencia elevada que tiene este material para fisurarse (como se puede observar en los ejemplos de la **Figura 1.1**), una de las causas principales por las que se deteriora y disminuye su durabilidad. Estas fisuras pueden aparecer tanto en la fase plástica como en las diversas fases de estado de endurecimiento y por motivos muy diversos. Pequeños movimientos durante el encofrado, el asentamiento plástico y la retracción plástica, debido a una rápida pérdida de agua en la fase plástica, pueden dar lugar a aparición de esta patología en la superficie de las piezas de hormigón. A su vez, la intemperie, la retracción por secado, tensiones térmicas, los errores cometidos en el diseño y en los detalles de la obra, las reacciones químicas, una sobrecarga constante o una carga externa también son algunos de los posibles causantes de fisuras en las fases de estado de endurecimiento del hormigón [1]. Hay que tener en cuenta, que las estructuras de hormigón tienen una resistencia a tracción y ductilidad relativamente baja, por lo que para hacer frente a este tipo de esfuerzos en el hormigón se embeben barras de acero corrugado. Estas barras de refuerzo tienen un efecto positivo a la hora de controlar el ancho de fisura controlando la retracción plástica. Sin embargo, no pueden evitar la aparición de estas fisuras.

A pesar de que la aparición de fisuras no tiene por qué suponer un peligro o reducir la resistencia del hormigón en edades tempranas, sin lugar a dudas, la formación de estas puede ser un riesgo para la vida del hormigón a largo plazo. Para intentar subsanar los problemas derivados de esta patología se asigna anualmente un presupuesto para las estructuras de hormigón en muchos países del mundo. La estimación que se hace del coste de reparación

y mantenimiento por fisura es de 147\$/m³ de hormigón, mientras que el precio de este material se mueve generalmente, entre los 65\$ y 80\$ por unidad de volumen. [2] Es por ello, que los métodos preventivos que permiten evitar la formación de estas fisuras y garantizar la no aparición de las mismas son cruciales.



Figura 1.1. [Fisuras en obras de hormigón ocasionadas por diferente patología.]

1.2. Tratamientos pasivos y tratamientos activos.

Los tratamientos que se emplean en los casos de fisuras y poros del hormigón se dividen generalmente en dos grupos, tratamientos activos y tratamientos pasivos. Los tratamientos pasivos son aquellos que solamente pueden reparar las fisuras de la superficie, mientras que los tratamientos activos pueden reparar fisuras tanto interiores como exteriores. Para mejorar la durabilidad y prevenir la penetración de materiales agresivos dentro del hormigón, los tratamientos pasivos pueden aplicarse mediante recubrimientos externos como mezclas de productos químicos y polímeros. En los tratamientos pasivos, cuando sean detectadas las fisuras, estos selladores se aplicarán mediante inyecciones o dispositivos de spray dentro de las fisuras. Estos productos selladores constan habitualmente de materiales químicos como resinas epoxídicas, plásticos clorados, ceras, poliuretano, acrílicos y siloxano. Aunque los tratamientos pasivos se pueden aplicar en muchas de las estructuras de hormigón existentes, tienen varias limitaciones que dificultan su uso. Una pobre resistencia a la intemperie, sensibles a la humedad, baja resistencia al calor, una mala unión con el hormigón, suelen ser susceptibles a la degradación y delaminación con la edad son algunos de las limitaciones que sufren estos selladores. Otras, como los diferentes coeficientes de dilatación y retracción entre el material sellante y el hormigón sencillamente hacen que, en determinados casos, se traten de soluciones inviables.

Las técnicas de tratamiento activo, se conocen como técnicas de auto-reparación o auto-curativas (self-healing en inglés) pueden funcionar de forma independiente en diferentes condiciones e independientemente de la

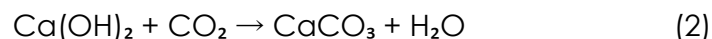
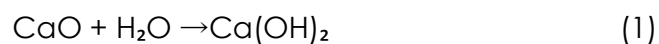
posición en la que se encuentre la fisura (interior o exterior). Estos tratamientos tienen la capacidad de activarse inmediatamente sobre la fisura que se esté formando sellándola de forma instantánea prácticamente. Estos mecanismos de auto-reparación en el hormigón se abordan desde tres estrategias principales:

- 1) La curación autógena.
- 2) La encapsulación de un material polimérico.
- 3) La producción microbiana de carbonato cálcico.

Un tratamiento ideal debe tener la calidad, la vida útil suficiente, la capacidad de penetración y la capacidad de curar fisuras en repetidas ocasiones en el número de veces que sea necesario.

1.2.1. La reparación autógena.

La curación o reparación autógena es el proceso natural de la reparación de fisuras de hormigón que puede darse con presencia de humedad o agua. La reparación autógena llena las fisuras a través de la hidratación de las partículas de cemento sin hidratar o por carbonatación de hidróxido de calcio disuelto. La hidratación de óxido de calcio produce hidróxido de calcio, que puede reaccionar con el dióxido de carbono presente en la atmósfera. Como puede verse en las ecuaciones 1 y 2, estas reacciones terminan en la producción de carbonato de calcio [3]. Debido a la abundancia en la naturaleza y compatibilidad con las composiciones cementicias, el carbonato de calcio es uno de los rellenos más utilizados para tapan los huecos, porosidades y fisuras en el hormigón.



El éxito de la reparación autógena depende en gran parte de factores como la humedad o el agua presente en el ambiente, como ya se ha mencionado anteriormente, o la cantidad de cemento no hidratado y la composición del hormigón. Por otra parte, se ha comprobado que sólo las fisuras que se sitúan entre 0,1 y 0,3 mm pueden ser rellenadas mediante reparación autógena. Una forma muy práctica de mejorar este tipo de reparación es reducir la relación agua-cemento (A/C). Sin embargo, el aumento de la parte de cemento para reducir esta relación (A/C) tiene efectos adversos en la trabajabilidad de la mezcla y aumenta la demanda de producción de cemento.

1.2.2. Encapsulación de material polimérico.

Se trata del segundo mecanismo de auto-reparación que se considera como tratamiento activo. Este método ayuda a rellenar las fisuras por conversión del agente reparador en una espuma en presencia de humedad. A pesar de la liberación de sustancias químicas a partir de pequeñas fibras incorporadas dentro del hormigón, cumplen la función de rellenar las fisuras [4], estos materiales no se comportan de la misma forma que algunas composiciones de hormigón o en diferentes condiciones, y en algunos casos, pueden causar una extensión de la fisura existente. Además, este mecanismo de auto-reparación requiere de unas cápsulas que puedan ser fácilmente mezcladas con el cemento y que puedan resistir en la matriz de hormigón. Y lo que es más importante si cabe, el embebido de las cápsulas debe de proteger al agente reparador durante un periodo de tiempo muy largo y a la vez, no debe influir en el hormigón, ni en la trabajabilidad ni en las propiedades mecánicas del mismo. Estos últimos requisitos hacen de este segundo método de encapsulación un mecanismo complejo en la práctica para la aplicación concreta de auto-reparación comercial.

1.2.3. Producción microbiana de carbonato cálcico.

Debido a los inconvenientes de los tratamientos existentes, existe una gran demanda de posibles alternativas a los métodos de tratamiento activo. Recientemente, entre los investigadores han emergido nuevos enfoques biotecnológicos que abordan el problema planteando como solución una combinación entre tratamientos activos y pasivos. El proceso de auto-reparación biológico se basa en la producción de carbonato cálcico a través de la biomineralización. El incremento exitoso de este innovador tratamiento se traduce en un período de vida útil de las estructuras de hormigón más largo, así como una reducción significativa en la producción de cemento y su sustituto estructural.

La biomineralización, por tanto, se refiere al proceso de formación de minerales por organismo vivos, que es un proceso muy común en la naturaleza. La biomineralización se logra mediante un proceso de mineralización inducido biológicamente. Este proceso de mineralización inducido biológicamente se produce por lo general en un medio ambiente abierto como consecuencia de la actividad metabólica microbiana incontrolada [5]. En este proceso, los biominales se forman mediante la reacción de los productos metabólicos, generados por microorganismos, con el medio ambiente que lo envuelve. En la **Figura 1.2** podemos distinguir una estructura bacteriana y un diagrama esquemático de cómo produce carbonato cálcico. La precipitación mineral se produce

por la unión exitosa de los iones cargados positivamente con las paredes de las células microbianas, con carga negativa. La mineralización biológica inducida generalmente se produce en un medio ambiente anaeróbico o oxic-anoxic límite. Su efectividad depende en gran medida de la concentración de carbono inorgánico disuelto, pH o la temperatura. Entre la producción generalizada de minerales a través de la biomineralización, la precipitación de carbonato de calcio es especialmente interesante debido a la capacidad de unión eficiente y compatibilidad con diferentes composiciones de hormigón.

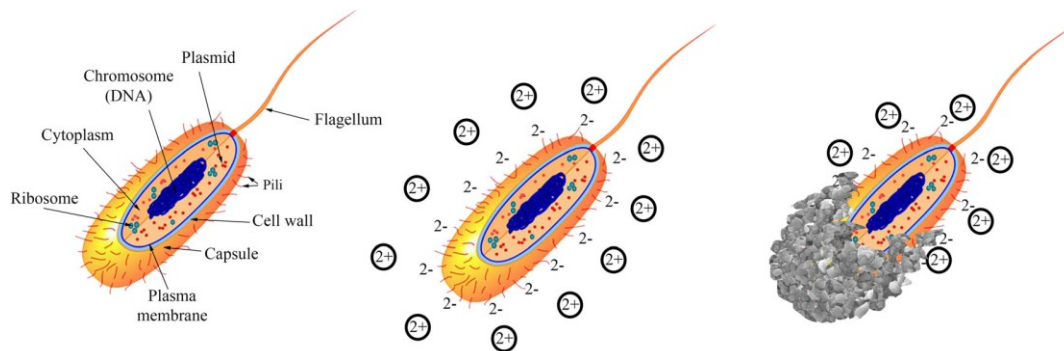


Figura 1.2 (a) [Estructura de una bacteria.] (b) [Pared celular cargada negativamente con presencia de iones cargados positivamente.] (c) [Producción mineral por medio de la unión de iones a la pared vegetal.]

1.3. Precipitación carbonato cálcico.

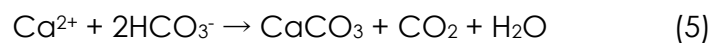
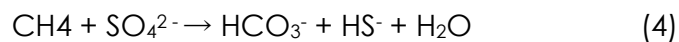
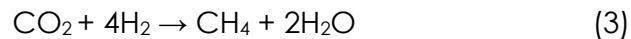
Como ya se ha comentado, se sabe que ciertos microorganismos, concretamente las bacterias producen compuestos o sustancias químicas como por ejemplo carbonatos, sulfuros, silicatos y fosfatos. La formación de carbonato cálcico es beneficiosa para el hormigón por su compatibilidad con las diversas composiciones cementicias. A través del proceso de mineralización inducido biológicamente, el carbonato cálcico puede precipitarse en presencia de una fuente de calcio. Durante este proceso, el carbonato es producido por microorganismos extracelularmente a través de dos vías metabólicas llamadas autótrofos y heterótrofos.

1.3.1. Vía autótrofa.

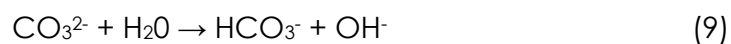
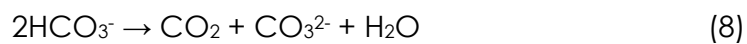
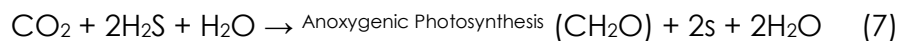
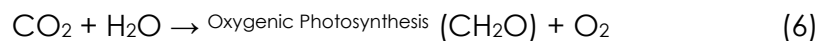
Ocurre en presencia de dióxido de carbono para que los microbios conviertan el dióxido de carbono en carbonato a través de tres formas distintas:

- 1) Por metanogénesis no metilotrónica
- 2) Fotosíntesis oxigénica
- 3) Fotosíntesis anoxigénica

La metanogénesis no metilotrónica convierte el dióxido de carbono e hidrógeno en metano (ecuación 3). De acuerdo con esto, la oxidación anaerobia del metano por los electrones receptores, como los sulfatos, dan como resultado la producción de bicarbonato (ecuación 4) [6]. El carbonato producido en este momento, da lugar a la precipitación de carbonato cálcico con la presencia de iones de calcio, tal y como se muestra en la ecuación número 5. Esta es la forma más común en los sedimentos marinos.



Los procesos de fotosíntesis son otra vía autótrofa para producir carbonato de calcio en presencia de iones de calcio. Hay dos grupos de bacterias fotosintéticas: las oxigénicas y las anoxigénicas. Tanto las primeras como las segundas emplean diferentes tipos electrones para producir el metanol. Como se muestra en la ecuación 6, el agua es el elemento que cede electrones en la fotosíntesis oxigénica. En la fotosíntesis anoxigénica sin embargo, es el sulfuro de hidrógeno (H_2S) el que cede electrones en la reacción redox, como se puede comprobar en la ecuación 7. Por este motivo no se genera oxígeno, y recibe el nombre de fotosíntesis anoxigénica. La eliminación del dióxido de carbono durante la fotosíntesis microbiana a causa de las soluciones de bicarbonato da como resultado la producción de carbonato. Este fenómeno produce un incremento localizado de pH y finalmente la precipitación de carbonato cálcico en presencia de iones de calcio [7].



Este proceso de precipitación de calcio a través de la fotosíntesis solamente es posible en presencia de dióxido de carbono en el medio ambiente. Esto indica, que la vía de la fotosíntesis sólo puede usarse en las áreas en las que la estructura de hormigón se exponga a dióxido de carbono y a la luz.

1.3.2. Vías heterotróficas.

Algunos grupos microbianos pueden precipitar cristales como resultado de su crecimiento en diferentes hábitats naturales. La formación de estos cristales es atribuible a la composición del medio utilizado para el crecimiento de la bacteria heterótrofa y también es un fenómeno muy común en la naturaleza. El crecimiento heterótrofo de diferentes bacterias como pueden ser *Bacillus*, *Arthrobacter* y *Rhodococcus*, **Figura 1.3**, especies que podemos encontrar en sales ácidas (acetato, lactato, citrato, succinato, oxalato, malato y glioxilato) dan como resultado la producción de minerales de carbonato.

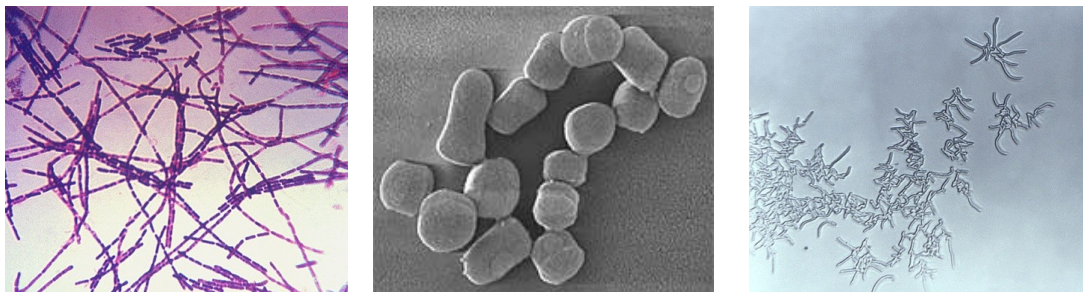
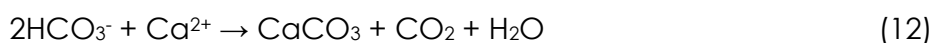


Figura 1.3 (a) [Bacteria *Bacillus anthracis*.] (b) [Bacteria *Arthrobacter chlorophenolicus*.]
(c) [Bacteria *Rhodococcus*]

Estas bacterias utilizan compuestos orgánicos como fuente de energía. Basándose en las fuentes de sales y carbón presentes en el medio, estas bacterias son capaces de producir varios cristales como carbonato cálcico y carbonato magnésico. Las reacciones químicas para formar carbonato cálcico en presencia de etilo de calcio como fuente de ácido de bajo peso molecular se enumeran en las ecuaciones siguientes:



La precipitación de carbonato cálcico a través de la utilización de los ácidos orgánicos ha sido ampliamente documentada en diferentes ambientes, incluyendo cuevas, ambientes marinos, lagos y estratos del suelo. Se observó que la utilización heterótrofa de comunidades bacterianas (*Arthrobacter* y *Rhodococcus*) aislada de estalactitas en la cueva podría producir carbonato cálcico en presencia de acetato

cálcico. Por otra parte, la contribución de especies *Arthrobacter* y *Rhodococcus* aisladas de ambientes polares sobre la precipitación de cristales de carbonato cálcico con citrato de calcio y acetato cálcico como fuente de carbono se ha investigado ampliamente. Una investigación, encontró que las especies de *Bacillus* y *Arthrobacter* son capaces de precipitar carbonato cálcico bajo un medio alcalino carbonatado. La viabilidad de estos microorganismos en una matriz de hormigón serán discutidos más adelante.

La presencia de ácido orgánico como la única fuente de carbono y energía es la ventaja más importante de esta vía. Cabe destacar, que las propiedades de la pared celular de las bacterias, proteínas y sustancias poliméricas extracelulares tienen un efecto crucial sobre la morfología y mineralogía del carbonato cálcico producido.

1.4. Integración de los microorganismos en la matriz del hormigón.

El agente curativo (bacterias y nutrientes) se pueden insertar en la matriz de hormigón a través de la red vascular o se pueden mezclar directamente durante la preparación del hormigón. Por el método vascular se ha inspirado en el esqueleto humano, en el cual los huesos constan de dos partes. La parte exterior es el hueso cortical que es compacto, mientras que la parte interior del hueso es esponjosa, el tejido trabecular. Como se muestra en la **Figura 1.4 a)**, mediante la técnica vascular se suministra el agente curativo desde fuera de la estructura usando la propia red vascular que ya ha sido incorporada a la matriz durante la preparación del hormigón. Conforme aparece una fisura, el agente curativo se mueve a través de los huecos debido al gradiente de presiones este y la posición de las fisuras. Dry (1994) [4] propuso un mecanismo de auto-reparación en el que la parte interior y exterior del hormigón se unen mediante fibras huecas vasculares simples o múltiples. En otra investigación más reciente, Sangadji y Schlangen (2013) [8] simularon estas redes vasculares con hormigón cilíndrico cuyo núcleo era poroso y las partes exteriores compactas. El núcleo poroso distribuye el agente curativo a través de la matriz del hormigón, y se activa cuando la fisura aparece en la parte exterior de la estructura. El método de la red vascular presenta sin embargo varias deficiencias que lo hacen parecer poco práctico. Primero, el agente reparador debe tener una viscosidad constante a lo largo de la vida útil del hormigón para que fluya fácilmente, así como para prevenir fugas de acuerdo a las condiciones ambientales. Además, si la cantidad de agente curativo libreado es mayor que la capacidad de la fisura, puede provocar problemas estéticos. Segundo, es complicado distribuir de forma homogénea esos vasos que contienen el agente reparador por toda la estructura. Y por último, la

incorporación de este sistema vascular puede hacer disminuir la unión entre las composiciones de hormigón y por tanto, llevar a una delaminación estructural.

Las bacterias y los nutrientes pueden ser incorporados directamente en la matriz del hormigón durante la preparación de este, como se muestra en la **Figura 1.4 b)**. En este proceso, los agentes reparadores se disuelven en agua, y acto seguido se añaden a la mezcla de cemento y arena. Las bacterias alcalófilas tales como algunas especies de *Bacillus* pueden tolerar el ambiente extremo del hormigón. Es por ello que son las especies más atractivas para los bio-hormigones auto-reparables. Los estudios demuestran que estas bacterias formadoras de esporas de membrana gruesa pueden sobrevivir sin nutrientes hasta cientos de años. Por otra parte, las endosporas latentes son capaces de soportar los cambios ambientales o químicos, así como las radiaciones ultravioletas y tensiones mecánicas.

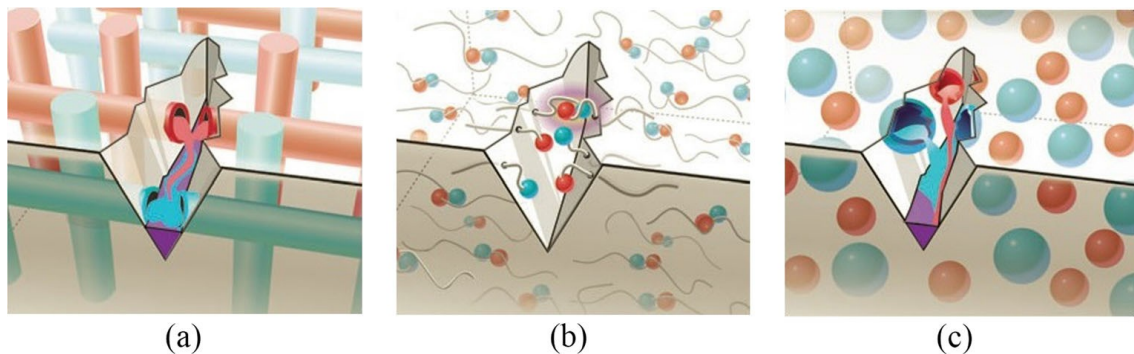


Figura 1.4 [Los tres tipos principales de autorreparación: a) vascular b) mezcla con otros componentes c) encapsulación.]

Sin embargo, la incorporación directa de microorganismos en materiales de construcción, tales como el hormigón influye drásticamente en la actividad metabólica microbiana. Un alto pH (por ejemplo mayor que 11), y unas condiciones secas del hormigón hacen a las bacterias vulnerables hasta la muerte. Jonkers *et al.* (2010) [9] incorporó esporas de *Bacillus cohnii* directamente en la matriz del hormigón y se analizó el número de células viables en la muestra de hormigón después del curado a edades de 9, 22, 42 y 153 días. Aunque el número de células de estas bacterias viables en la matriz de hormigón era aproximadamente constante hasta los 9 días, disminuía drásticamente después de 22 y 42 días un 80 y un 90%, respectivamente. Estos resultados indican que las células de las bacterias pueden ser viables un máximo de 4 meses (135 días) en la estructura del hormigón. Por lo tanto, para ayudar a las bacterias a permanecer vivas en condiciones adversas, para un período de tiempo más largo, es esencial la incorporación de esporas inmovilizadas.

La protección bacteriana a través de la encapsulación o por materiales protectores como hidrogel o partículas de arcilla expansiva ha sido el objeto de muchas investigaciones recientes. La encapsulación del agente reparador en cápsulas tubulares o en esferas, **Figura 1.4 c)**, ayuda a incrementar la viabilidad de las bacterias durante un periodo largo de tiempo. Estas microcápsulas resisten fuerzas mecánicas durante el proceso de preparación del hormigón. El proceso de curación se inicia cuando las cápsulas se rompen con la formación de las fisuras. La preparación de la cápsula y el mezclado con el agregado, así como los espacios vacíos que quedan después de la activación de la cápsula son los retos a los que se enfrenta esta técnica de encapsulación. El efecto de la incorporación del agente reparador en recipientes tubulares se ha investigado recientemente. Las soluciones alcalinas tienen un impacto perjudicial sobre materiales de silicato como el vidrio. Debido al hecho de que los compuestos a base de cemento son altamente alcalinos, las paredes de los tubos de vidrio se disuelven y en consecuencia se produce una corrosión del material. La tolerancia de la cápsula se verá reforzada durante la mezcla por una reducción del radio de la cápsula o mediante el aumento del espesor de la pared de la cápsula. Sin embargo, una disminución elevada del radio de la cápsula, puede hacer que las cápsulas no se activen (no se rompan) con la aparición de la fisura. Por este motivo, se recomienda la utilización de cápsulas que se vuelvan frágiles con la edad.

Algunos materiales cerámicos pueden permanecer intactos durante la mezcla y actuar correctamente en un entorno agresivo, lo que hace superar las deficiencias de la cápsula de vidrio. El aumento de la cantidad de cápsulas incorporadas logrará cubrir una mayor área en la superficie de la estructura. No obstante, esto puede disminuir la cohesión entre los materiales aglutinantes, que con el tiempo disminuye la trabajabilidad del hormigón. Además, se ha averiguado que llenando los poros de microcápsulas se puede ocasionar la aparición de poros más grandes, por lo que las propiedades mecánicas son peores que las muestras comparadas que no tienen microcápsulas. Esto se puede atribuir a los huecos que se generan después de la ruptura de estas microcápsulas. Por lo tanto, se puede concluir que la eficiencia de la encapsulación depende estrictamente del tamaño de las cápsulas, las propiedades de las mismas y su distribución por toda la matriz del hormigón. De esta forma, la inmovilización de las bacterias en hidrogel, gel de sílice, zeolita, arcilla expansiva, carbón activo granular y metacaolín puede abordar las deficiencias de la encapsulación. Esta inmovilización de las bacterias en hidrogel ya ha sido estudiada y la viabilidad de de las bacterias incrustadas en geles de sílice se ha probado en condiciones muy duras también. Se ha concluido que el hidrogel hinchado puede proporcionar el suministro de agua adicional para mejorar la eficiencia de la precipitación de carbonato cálcico para rellenar una fisura de una anchura de hasta 0,5 mm. En otra investigación, la bacteria fue inmovilizada dentro del silicagel y de poliuretano.

La protección de las bacterias y las algas mediante geles de sílice se vinculan a la conservación de la actividad enzimática. Por lo tanto, para obtener un mecanismo de "bio auto-reparación" satisfactorio para curar las fisuras que se produzcan en el hormigón, la investigación de estas partículas de protección que puedan preservar las bacterias durante periodos más largos de tiempo es crucial.

1.5. Conclusiones.

Como se comentó al inicio de este estudio del hormigón auto-reparable, dos de los atributos más importantes del hormigón para la construcción son su resistencia a compresión y su durabilidad. La influencia de la biomineralización en estos atributos necesita ser valorada, ya que las fisuras, el tamaño de los poros y la distribución de éstos pueden tener impactos adversos sobre las propiedades del hormigón y, en consecuencia, la vida útil de las estructuras de hormigón. La durabilidad del hormigón se puede mejorar mediante la reducción de absorción, permeabilidad y la difusión como los principales mecanismos para el transporte de líquidos y gases en hormigón. La influencia de los agentes reparadores de base biológica sobre la permeabilidad y la absorción de agua del hormigón se han ensayado en varios estudios. La permeabilidad y absorción de agua de las estructuras de hormigón se disminuyen por la presencia de estos agentes de base biológica. Wang *et al.* (2012) [10] estudiaron la influencia de la precipitación de carbonato de calcio sobre la permeabilidad por incorporación de células *Bacillus sphaericus*. Este ensayo demostró que la permeabilidad de la muestra de bacterias inmovilizadas con poliuretano disminuye en un orden de seis veces en comparación con muestras sin bacterias. Por otra parte, la eficacia de las *Bacillus sphaericus* en diatomita o tierra de diatomeas fue patente. Los resultados indicaron que la absorción de agua en la muestra con bacterias fue del 50% de las muestras sin bacterias. Achal *et al.* (2011) [11] observaron en sus ensayos que la aplicación de *Bacillus sphaericus* causó la impermeabilización del hormigón. Una prueba de permeabilidad mostró que el coeficiente de absorción de agua en las muestras tratadas fue de seis veces menor durante un período de 168 horas. Este fenómeno puede estar relacionado con la presencia del nuevo carbonato cálcico formado como resultado del metabolismo bacteriano. El enfoque biológico puede aumentar sustancialmente la durabilidad de la estructura del hormigón por las fisuras y cavidades en forma de un sellado sostenible.

La aplicación de este sistema de autorreparación mediante la incorporación de microorganismos en la matriz del hormigón es muy recomendable frente a otros métodos existentes debido a la capacidad de unión eficiente que se obtiene, la compatibilidad con composiciones de hormigón y la sostenibilidad. Es capaz de llenar microfisuras profundas e

impedir el desarrollo de fisuras. Todo esto, puede reducir el costo de mano de obra de reparación y mantenimiento [4]. Además, reduce la emisión de dióxido de carbono debido a la disminución de la producción de cemento. Por lo tanto, este método de mezcla de agente de autorreparación con cemento y otros materiales durante la fase de colada resulta más conveniente en comparación a otros métodos o tratamientos convencionales.

Para la futura aplicación industrial temprana, se deben abordar varios desafíos críticos. A pesar de los recientes avances en el diseño de protocolos para hormigón autorreparable de base biológica, los estudios existentes siguen sufriendo para reducir los costos y el tiempo de experimentación. Además, la viabilidad de la utilización del agente de curación durante la mezcla y la actividad de las bacterias en el hormigón endurecido durante un largo periodo de tiempo, necesita de mayor investigación. La cohesión entre el relleno y el borde de la fisura es otro criterio que se debe abordar para evitar la nueva formación de fisuras. Además, la robustez de hormigón a través del proceso de la autorreparación de base biológica o los costes de producción son otros desafíos. Es decir, existe una necesidad de investigación sobre la reducción de los costes asociados, o lo que viene siendo, bacterias, nutrientes y mano de obra. Como es lógico pensar, nuevas y diferentes estrategias para aumentar la eficacia de la autorreparación y reducir los costos animará a los contratistas a utilizar estos hormigones como el material de construcción en un futuro próximo.

2. Hormigón fotocatalítico o descontaminante.

2.1. Introducción.

Como ya se ha expuesto anteriormente, el hormigón es, si no el más utilizado, uno de los materiales más usados para la construcción, tanto arquitectónica como civil, en todo el mundo. Es la segunda sustancia más consumida en la Tierra después del agua. Por desgracia, los principales componentes contenidos en el hormigón contribuyen en gran medida a creación y emisión de gases de efecto invernadero. Las emisiones de gases contaminantes durante la fabricación del cemento es uno de los grandes problemas a los que se ha enfrentado esta industria. Una importante fuente de contaminación del aire es causado por el polvo de hormigón lanzado a causa de la demolición de estructuras o incluso a causa de desastres naturales. Además, el hormigón se enfrenta al problema de que tiende a ensuciarse cuando se expone dentro de un área contaminada. Todas estas situaciones han llevado a la industria a desarrollar una tecnología innovadora y encontrar materiales alternativos que respeten el medio ambiente con el fin de apoyar el desarrollo sostenible.

Algunos de los productos que se ha desarrollado gracias a estas nuevas investigaciones son los hormigones geopolímeros que tienen un comportamiento de auto-limpieza. Se trata de una alternativa verde para superar todos estos inconvenientes que se han mencionado. Esto se debe a que ofrecen grandes beneficios ambientales tales como la disminución de las emisiones de CO₂, pero también beneficios económicos, de durabilidad y ecológicos. El cemento geopolímero tiene además sus propias propiedades únicas que les hacen ser capaces de resistir a altas temperaturas y tener una alta resistencia a la sal y al ácido [12]. El hormigón auto-limpiante o cemento fotocatalítico mantendrá la superficie libre de suciedad y mantiene su color, incluso en condiciones de contaminación y zonas industriales. A este hormigón se le ha denominado también hormigón verde debido a sus propiedades de auto-limpieza [13], aunque puede llevar a confusión con otros tipos de hormigones que ofrecen otras prestaciones.

La tecnología de auto-limpieza se comercializa tanto para aplicaciones de interior como de exterior. Existen diversas aplicaciones de esta tecnología de auto-limpieza, como en las pinturas, vidrios, textiles, azulejos, etc. Los vidrios de las ventanas o los azulejos (baldosas, tejas, etc.) son modificados añadiendo una delgada película fotocatalítica de TiO₂ con funciones de auto-limpieza. Esta tecnología se ha empleado en la superficie de vidrio de la

Opera Nacional Hall china, **Figura 2.1**. En Japón, por otra parte, son muy utilizadas las ventanas de auto-limpieza y tejas ecológicas. De esta forma Japón y países de Europa están usando esta tecnología para hacer que sus ciudades altamente contaminadas se mantengan limpias y reducir el efecto de la contaminación del aire.

Las nanopartículas de TiO_2 se aplican también en otros materiales de construcción, especialmente en el hormigón con el fin de mejorar las propiedades de auto-limpieza. La adición de óxido de titanio en los materiales de hormigón puede contribuir a la purificación de aire y la auto-limpieza de las superficies debido al proceso fotocatalítico que se activa por la radiación de la luz ultravioleta. De este modo, el edificio puede mantener su aspecto estético y mejorar la calidad del aire por la degradación de los contaminantes presentes en el medio gracias a este proceso automático. Este hecho se puede observar a través del ejemplo del cemento blanco que contiene nanopartículas de dióxido de titanio con el que se ha revestido el techo del Dubai Sports City's Cricket Stadium, **Figura 2.1**, y también para el diseño de una iglesia en Roma. A partir del resultado, se demostró que los edificios podrían mantener su color original durante años.

Brevemente, en otros ámbitos como el de la automoción, la industria ha desarrollado unos recubrimientos auto-limpiables con propiedades antiniebla para mejorar la limpieza y el antideslumbramiento de las ventanas. Hay varias reseñas de estudios que demuestran que con el recubrimiento de dióxido de titanio se pueden mejorar las propiedades mecánicas de las fibras de algodón y también la eliminación de grandes manchas producidas por bacterias. Por lo tanto, los efectos de la aplicación de materiales auto-limpiables, como el dióxido de titanio sobre hormigón geopolímero, son para mejorar la durabilidad y el efecto estético de la contaminación.

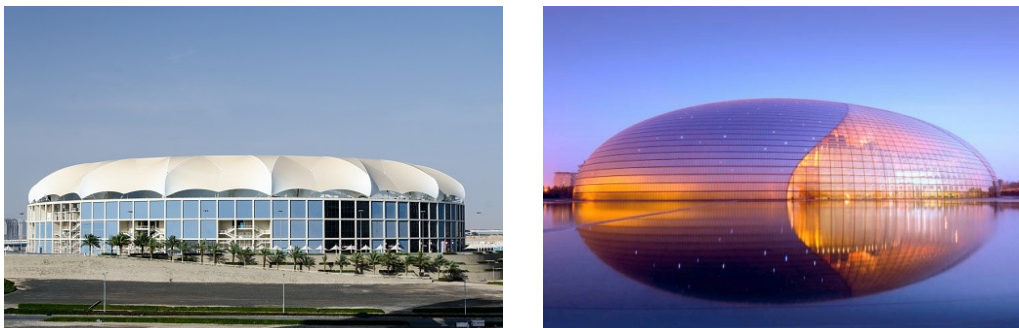


Figura 2.1 (Izquierda) [Dubai Sports City's Cricket Stadium, Dubai].
(Derecha) [Opera Nacional Hall, China]

2.2. Aproximación al concepto de auto-limpieza.

El principio de auto-limpieza fue descubierto en 1973 por el botánico Wilhelm Barthlott. Los productos de reacción de auto-limpieza eliminan fácilmente los agentes contaminantes con la lluvia, debido a las acciones fotocatalíticas añadidas de TiO_2 , gracias a la superficie hidrófila que generan, como se aprecia en la **Figura 2.2**. La aplicación del dióxido de titanio como fotocatalizador al hormigón se centra en los efectos auto-limpiable y purificación del aire. El hormigón auto-limpiable se ve envuelto en una reacción fotocatalítica, que contribuye a la eliminación de compuestos orgánicos volátiles como el formaldehído, en presencia de la radiación ultravioleta del sol. Cuando la luz y el calor inciden en la superficie del hormigón, el dióxido de titanio utiliza la energía para descomponer la suciedad en moléculas de oxígeno básico, agua y dióxido de carbono (CO_2), nitrato y sulfato. De esta forma, la reacción fotocatalítica convierte las partículas o agentes contaminantes del aire en formas menos tóxicas en presencia de luz UV. De este modo, se elimina los contaminantes e impurezas del medio circundante.

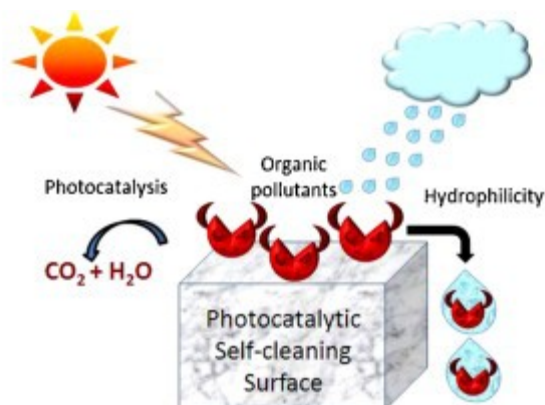


Figura 2.2. [Reacciones fotocatalíticas sobre la superficie de hormigón]

Hay una gran cantidad de materiales que pueden actuar como fotocatalizadores. Se puede apreciar en diversas investigaciones que se han llevado a cabo con el fin de investigar la influencia de estos fotocatalizadores sobre materiales cementicios. Las nanopartículas se utilizan como fotocatalizador con el fin de mejorar el rendimiento de las propiedades del cemento. Estas nanopartículas que se añaden al cemento pueden funcionar como una mezcla en la pasta de cemento o para sustituir parte de este. Actúan como agentes de relleno en el espacio vacío, bien distribuidas, aumentando la velocidad de hidratación y la tendencia a aglomerarse durante el mezclado. Las nanopartículas que más comúnmente se emplean

en productos de cemento son el óxido de silicio (SiO_2), el óxido de zinc (ZnO), dióxido de titanio (TiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y nanotubos de carbono. Algunos estudios han revelado que en hormigones que contienen TiO_2 , la resistencia a la penetración de cloruro es más alta que los hormigones que contienen las mismas cantidades de SiO_2 , por ejemplo. Esto es debido a que el refinamiento de los poros de la estructura aumenta mientras que la penetración del cloruro disminuye [14]. Por ello, la adición de nanopartículas de dióxido de titanio muestra un resultado positivo con un menor número de fisuras en la microestructura compacta y aumenta la formación de geopolímeros. La resistencia a compresión se puede mejorar mediante el aumento de la cantidad de estas nanopartículas en el cemento modificado.

2.2.1. Papel de las nanopartículas de dióxido de titanio en el mecanismo de auto-limpieza.

El dióxido de titanio es ampliamente utilizado para producir pavimentos de hormigón mezclando las nanopartículas dentro de la superficie del pavimento. El dióxido de titanio tiene tres estructuras cristalinas diferentes, que son la anatasa, rutilo y brookita. La eficacia de la reacción fotocatalítica está influenciada por la estructura del dióxido de titanio donde las partículas de anatasa muestran mayor eficiencia en estado cristalino y transparente cuando se aplican sobre el sustrato. La facilidad de limpieza del sustrato puede ser mejorada mediante esta nanoestructura de dióxido de titanio. Pero una de las razones principales por la cual se emplea TiO_2 con materiales cementicios es que solo se requiere de agua, oxígeno y luz solar para la reacción de la fotocatalisis.

Además, se trata de un fotocatalizador que puede descomponer casi cualquier compuesto orgánico con la presencia de la luz solar. Si hubiera suciedad en la superficie, el agua penetraría por debajo de estas partículas y se eliminaría de la forma que indica la **Figura 2.3**. Por lo general, el dióxido de titanio fotocatalizador son recubrimientos dispuestos como una delgada película sobre la superficie. Son varios los métodos para realizar el recubrimiento como la pulverización, revestimiento por inmersión en gel, electrodeposición, etc. Estas técnicas de recubrimiento se utilizan para incorporar los fotocatalizadores en los materiales de construcción. Cuando las propiedades de las nanopartículas se transfieren a la superficie de los sustratos, aparecen las funciones de auto-limpieza.

El TiO_2 se aplica no solamente en el campo de la construcción si no también en la industria alimentaria, producción de papel, cosméticos, etc. Lo que hace que sea tan ampliamente utilizado son sus características, como su alta eficiencia de la catálisis, buena estabilidad química y térmica, su baja toxicidad y tener un bajo coste.

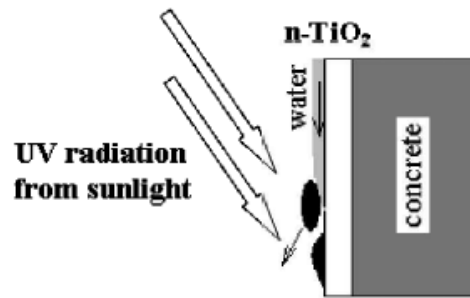


Figura 2.3 [Efecto auto-limpieza del TiO₂ en la superficie del hormigón.]

2.3. Métodos de preparación del hormigón descontaminante.

Hay una gran cantidad de métodos para preparar una muestra de pasta de cemento con adición de nanopartículas de dióxido de titanio. Se ha elaborado un estudio sobre nano-TiO₂ con varios tamaños de partículas (se muele y se tamiza durante sesenta minutos en el agitador de tamices), que tiene como objetivo el investigar el efecto de la adición de nano-TiO₂ sobre un lecho de geopolímeros fluidificados a base de cenizas volantes. Existe una recomendación de uso del dióxido de titanio como una solución mezclada con agua para una mejor dispersión. Las nanopartículas de dióxido de titanio se empapan en agua antes de mezclarlas con cemento, y entonces, se hace vibrar mediante ultrasonidos durante 30 minutos para una buena distribución. Pasados tres minutos, el agua se mezcla con el cemento de baja velocidad de agitación (800rph). Para la preparación de muestras, se añade previamente el polvo de dióxido de titanio al cemento seco y posteriormente se añade el agua.

2.4. Importancia de la auto-limpieza

La contaminación del aire ha supuesto una implicación negativa en la salud del hombre. Los principales contaminantes que se produce por la actividad humana son el óxido de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂), compuestos orgánicos volátiles (COV), etc. Por tanto, cuando las reacciones fotocatalíticas absorben los rayos ultravioletas del sol, se forman los radicales de hidróxilo y aniones superóxidos, que tienen la capacidad de reaccionar con las moléculas contaminantes como SO_x, NO_x, etc. Hoy en día, la contaminación atmosférica también provoca el deterioro exterior de los edificios debido a la deposición de materias orgánicas y contaminantes. El hormigón auto-limpiable tiene potencial para mantener limpia la ciudad mediante la reducción de los contaminantes del aire. Debido a sus

propiedades, la auto-limpieza puede ahorrar el coste de mantenimiento, y por este motivo también la vida útil de la estructura. Por otra parte, este mecanismo de auto-limpieza puede reducir el calor que se acumula en la estructura al reflejar también más luz, por lo que ayuda a mantener una temperatura más suave en temporadas de calor. El fotocatalizador que participa en la auto-limpieza también puede ser utilizado para purificar el agua y combatir enfermedades mediante la reducción de la propagación de gérmenes. El desarrollo de cementos fotocatalíticos ha tenido un considerable impacto en el efecto de descontaminación.

El mecanismo de auto-limpieza se utiliza ampliamente en los materiales de cementicios, ya que mejoran las propiedades mecánicas y el rendimiento de estos debido a sus propiedades. Existe un estudio que informó de que las propiedades mecánicas de las nanopartículas de dióxido de titanio que se agregaron en el cemento incrementaron la resistencia a flexión y a tracción del mortero de cemento [15]. También hay algunas investigaciones acerca de la adición de TiO_2 como recubrimiento cuando la capa de recubrimiento está directamente en contacto y expuesto a los contaminantes. El resultado muestra que el hormigón o mortero, que está cubierto por TiO_2 son menos afectados por los productos de hidratación del cemento. El dióxido de titanio mezclado con nanopartículas es muy ampliamente usado para producir pavimentos de hormigón, y por lo tanto, contribuyen a mitigar la contaminación del aire urbano. Por su parte, el cemento blanco con adiciones de dióxido de titanio se emplea en la superficie de los edificios para contribuir a la durabilidad del aspecto visual del edificio. La blancura del edificio se mantendrá por más tiempo debido a la acción fotocatalítica.

2.5. Producto comercial y ejemplo de uso del hormigón descontaminante.

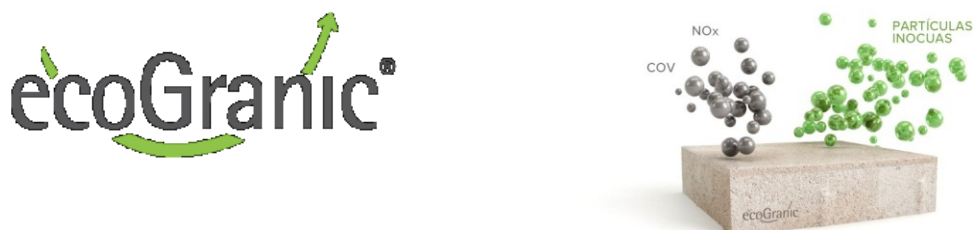


Figura 2.4 [Producto de hormigón auto-limpiable ecoGranic]

Existen diversas empresas especializadas en comercializar este tipo de hormigón. Un de ellas es PVT, un fabricante de losas y piezas de hormigón para pavimentos de exterior. El producto que ofrecen se denomina ecoGranic, **Figura 2.4**, una tecnología implementada en un prefabricado de hormigón que descontamina el aire mediante un proceso de oxidación natural similar a la fotosíntesis de las plantas. En su misma página web, <http://www.pvt.es>, dicen del propio producto que *“es muy eficaz en la eliminación de óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COVs) y material particulado (PM). Este producto prefabricado es altamente ecológico y sostenible. Se fabrica, entre otros, con materiales procedentes del reciclaje, especialmente de los sectores de la construcción e industrial.”* [16]

2.5.1. Ventajas que ofrece ecoGranic® frente a otros pavimentos similares.

A continuación se expone en la **Tabla 1** las ventajas de EcoGranic, al emplear una tecnología o técnica diferente a otros productos similares de hormigones fotocatalíticos, que le confiere una serie de ventajas con respecto a estos. Obviamente, se deja a un lado las ventajas con respecto a otro tipo de pavimentos comunes.

| Ventajas frente a los pavimentos que utilizan cemento fotocatalítico. |
|---|
| La efectividad del proceso de descontaminación es peor que en el producto ecoGranic. Utilizar un cemento fotocatalítico en lugar del correspondiente, siendo este un elemento estructural del hormigón, altera su dosificación. Al usar cemento fotocatalítico las partículas quedan embebidas dentro del cemento, reduciendo su superficie específica. Mientras que econGranic las partículas fotocatalíticas se encuentran en la parte superior de la baldosa, entre 7 y 12 mm, mejorando su efectividad. |
| Ventajas frente a los Pavimentos que contienen TiO₂ comercial. |
| Los pavimentos que contienen únicamente TiO ₂ comercial como fotocatalizador presentan una menor eficiencia. Esto se debe a que el TiO ₂ normal se active con radiación UV (<420 nm, 5% de la radiación solar), mientras que el pavimentos ecoGranic utiliza un TiO ₂ dopado especial, el cual es activado con radiación UV y visible (420-740 nm, 45% de la radiación solar). Además ecoGranic posee otras sustancias potenciadoras de la actividad del TiO ₂ dopado, las cuales aumenta la superficie de las partículas fotocatalizadoras y favorecen la reflexión de la luz. |

Ventajas frente a Spray o imprimaciones fotocatalíticas.

La principal ventaja que presenta frente a estos pavimentos es la durabilidad de los sistemas de imprimación. Los procesos de degradación como la abrasión y erosión constante producidos por el tráfico (peatonal y rodado) eliminan en breve tiempo la película fotocatalítica del pavimento. Esto es más difícil que ocurra si los aditivos son introducidos en la masa del hormigón durante su producción.

Tabla 2.1 Ventajas de ecoGranic sobre otros pavimentos con la misma tecnología.
Elaboración propia.

2.5.2. Hormigón descontaminante en la ciudad de Valencia.

Por otra parte, en la misma ciudad de Valencia podemos encontrar un proyecto en el cual se ha empleado el material con esta tecnología para peatonalizar una calle. Se trata de la céntrica calle Félix Pizcueta, **Figura 2.5**. El Proyecto de ejecución de aceras fue redactado por la Fundación InnDEA Valencia y es con cargo a Fondos Europeos del 7º Programa Marco, en el que se incluye el proyecto Light2CAT. Se trata de un proyecto I+D destinado a mejorar la calidad del aire atmosférico que desarrolla una tecnología de alto rendimiento basada en cementos fotocatalíticos tratados con dióxido de titanio (TiO_2). El plazo de ejecución de las obras de este proyecto es de 3 meses y el presupuesto global de licitación es de 132.411,38 euros. Light2Cat es un Consorcio europeo de empresas, instituciones gubernamentales y centros de investigación de Dinamarca, Suecia, Reino Unido, Italia y España.



Figura 2.5 [Calle Félix Pizcueta]

2.6. Conclusiones.

Este trabajo de investigación tiene como objetivo dar una visión general sobre el hormigón auto-limpiable o descontaminante. Esta aplicación promete ser en un futuro utilizada por diversos materiales de construcción. Con este desarrollo de la tecnología, la contaminación atmosférica puede reducirse y contribuir a la eliminación de compuestos orgánicos volátiles (COV) presentes en los ambientes interiores y exteriores.

A día de hoy, la contaminación del aire es un problema serio en el ámbito urbano que puede afectar a la salud humana. Por lo tanto, el hormigón descontaminante es una alternativa para proporcionar un entorno más limpio y mantener la apariencia estética del edificio. Mediante el desarrollo de materiales cementicios, la radiación ultravioleta del sol puede representar una de las soluciones a los problemas de contaminación. En conclusión, la auto-limpieza puede ser empleada en diversas aplicaciones, especialmente en los materiales cementicios que contribuyen a la sostenibilidad y conducen a un medio ambiente más verde. La investigación necesita enfocarse en la producción de un hormigón geopolímero funcional con comportamiento de auto-limpieza.

3. Hormigón biológico.

3.1. Introducción.

Al igual que ocurre en otros campos o sectores de la industria, en los últimos años ha crecido una preocupación por el desarrollo sostenible. Como ya se ha visto, esto ha derivado en nuevos estudios e investigaciones para reducir la huella ecológica que dejan los procesos humanos. Recientemente se ha dado a conocer un nuevo estudio de la Organización Meteorológica Mundial (OMM), perteneciente a la ONU, donde afirmaba que el CO₂ atmosférico rebasaba el umbral simbólico de 400 partes por millón, nuevo récord [17]. A esta preocupación por encontrar soluciones sostenibles que poder aplicar al campo de la construcción, se le une la búsqueda de nuevos sistemas constructivos que proporcionen a los edificios una estética nueva y vanguardista. Con una mezcla de las dos intenciones aparecen las fachadas verdes o jardines verticales, en las que la componente estética adquiere un gran valor, pero también la parte ecológica. En ocasiones, estos sistemas pueden ayudar a la eficiencia energética del propio edificio además de aumentar la superficie verde de las ciudades. Existen muy diversos y variados sistemas constructivos para abordar esta idea de fachadas y el mercado está lleno y cada vez más de soluciones posibles. Ejemplo de ello es la **Figura 3.1** donde aparecen edificios conocidos que emplean alguno de estos sistemas de fachada vegetal.



Figura 3.1. (Izquierda) [Edificio CaixaForum, Madrid (España)]. (Derecha) [Edificio consorcio, Santiago (Chile)].

A medida que van surgiendo nuevas investigaciones y estudios cercanos a este tema, surgen también nuevos materiales que permiten llevar a cabo estas mismas ideas. Este es el caso del hormigón biológico. Se trata de un hormigón que se convierte en una pared o revestimiento vegetal por sí mismo, sin la necesidad de las estructuras o elementos necesarios para la proyección de fachadas verdes. Se trata por tanto de lo que parece la evolución lógica a

este tipo de jardines verticales. Este hormigón es colonizado por especies de líquenes, algas y musgos. De esta forma se consigue una apariencia natural, viva y muy ecológica además de una estética muy interesante pues el color del edificio puede cambiar con respecto a la estación del año que se encuentre.

El hormigón biológico que se va a tratar más en profundidad en este trabajo es uno desarrollado por la universidad Politécnica de Cataluña, un hormigón de fosfato de magnesio (Magnesium-Phosphate Cement en inglés), de aquí en adelante se referirá a él como MPC. Se trata de la variedad más innovadora, aunque también podemos encontrar otro tipo de hormigones constituidos por varias capas de cementos, entre los que destaca la última de estas o la más superficial, compuesta por un hormigón carbonatado. En ellos puede producirse el proceso de colonización buscado por las especies vegetales ya mencionadas anteriormente.

3.2. Concepto de biorreceptividad.

En 1995, Guillitte [18] propuso el concepto de biorreceptividad para definir la capacidad que posee un material para ser colonizado por los organismos vivos. Se definieron tres niveles diferentes de biorreceptividad. La biorreceptividad primaria especifica el potencial inicial a la colonización. La biorreceptividad secundaria se refiere a las nuevas propiedades u otros factores como consecuencia de la acción de los organismos que colonizan el material. Y por último, la biorreceptividad terciaria corresponde a modificaciones de la biorreceptividad primaria o secundaria por las actividades humanas. Propiedades como la porosidad, el tamaño de poros abiertos, rugosidad, la composición química y el pH, se consideran los principales que afectan a la biorreceptividad primaria de materiales inertes. Estas propiedades mencionadas son fácilmente ajustables por medio de la dosificación (propiedades físicas) o por la naturaleza del aglutinante utilizado (pH y composición química).

Las modificaciones de la biorreceptividad de materiales cementicios podrían ser interesantes con el fin de estimular la colonización natural. Se sabe que los organismos podrían actuar como una protección en esculturas antiguas, proporcionar una mejora en la calidad del aire y, del mismo modo, proporcionar un valor estético adicional. Por otra parte, también se puede pensar en beneficios en materia de eficiencia energética ya que los organismos fotosintéticos capturan la energía de la luz solar. Por otra parte, los organismos vivos en materiales minerales de construcción tienen otras aplicaciones ya demostradas. Sin embargo, es importante delimitar cuales son los grupos de organismos interesantes y, posteriormente, evitar la aparición de patología significativa. De acuerdo a esto último, las microalgas, líquenes y

musgos son los organismos vivos más interesantes porque ninguno de ellos tiene un sistema de raíces reales que podrían dañar las estructuras de hormigón seriamente. Es de sobra conocido los daños que pueden ser ocasionados por las plantas y la aparición de otros organismos, en los cuales se ve como una patología los cambios de colores y modificaciones en las propiedades de la superficie.

El conglomerante hidráulico más común en la construcción es el Cemento Portland Ordinario (CPO). Los materiales de construcción hechos de CPO, tienen un pH inicial entre 12 y 13, aunque podría disminuir durante la vida de servicio. Sin embargo, otros conglomerantes hidráulicos como los cementos de base ácida podrían ser una alternativa para este propósito. El último de los grupos de conglomerantes hidráulicos fue desarrollado en el siglo XIX y depende de la interacción entre el ácido y un compuesto base. Su reacción da como resultado la formación de una solución salina de cemento hidrogel. Estos cementos de base ácida, tienen aplicaciones no solo en el campo de la construcción si no también aplicaciones médicas. Estos materiales han sido utilizados como cementos de fraguado rápido para trabajos de reparación, como material estabilizador para encapsular desechos y, más recientemente, en el desarrollo de nuevos materiales de construcción para promover la mejora del medio ambiente. [19]

De acuerdo con todo ello, la investigación que se llevó a cabo en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) junto con la Universidad de Gante, tuvo como objetivo el desarrollo de un panel de hormigón de múltiples capas con biorreceptividad mejorada. En dicho panel se propuso una mejora de la biorreceptividad para permitir el crecimiento biológico en una de sus capas, por lo que la consecución de un material de bajo pH de cemento se consideró una prioridad en dicho estudio. La **Figura 3.2** muestra un dibujo esquemático de la estructura de estos paneles. La primera capa consiste en un hormigón convencional y es responsable de la función estructural del panel. Por otra parte, la producción de esta capa dependerá de los requisitos del proyecto. Seguidamente a esta capa hay una segunda capa con la función principal de proteger a la primera. Esta capa podría tener una capacidad de impermeabilización y también podría mejorar la adhesión entre la primera y la tercera capa. A continuación, la tercera capa es la que tiene una biorreceptividad mejorada y la que está relacionada con el estudio mencionado anteriormente. Finalmente, la última capa permite diferentes diseños en la superficie.

Existen dos maneras diferentes de obtener un material cementicio de bajo pH. En primer lugar, se evaluó, mediante dos productos químicos en función de su fuerza ácida (un ácido débil y otro más fuerte), reducir el pH del CPO mediante adiciones y el efecto fue elevado. En segundo lugar, se escogió Cemento de Fosfato de Magnesio (Magnesium Phosphate Cement:

MPC) como un cemento de base ácida, y se estudió su idoneidad como aglutinante para el hormigón.

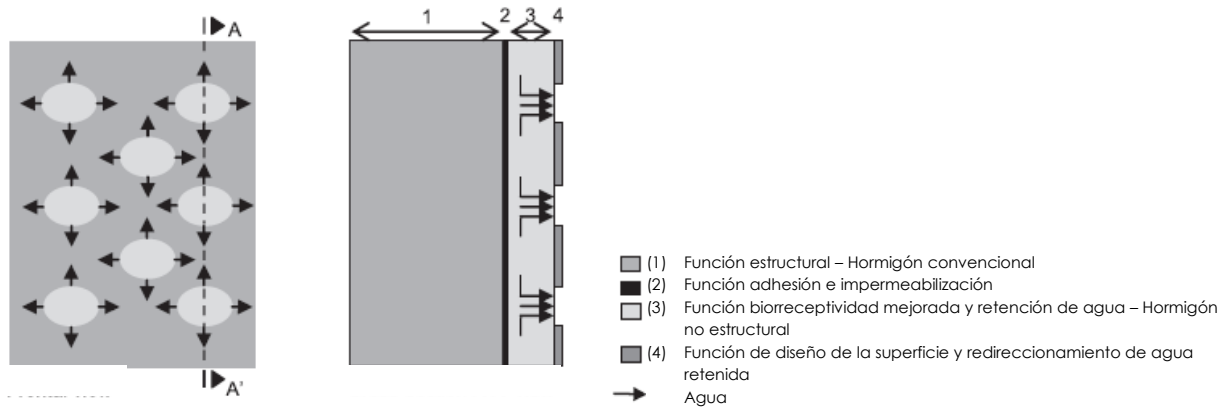


Figura 3.2 [Estructura de un panel de hormigón multicapa de biorreceptividad mejorada.]

3.3. Materiales y métodos.

En el marco del objetivo mencionado, para la investigación se ha desarrollado la siguiente metodología. Por una parte, se llevó a cabo la evaluación del efecto de las adiciones ácidas a las propiedades CPO. Por otra parte, se desarrolló una caracterización completa de diferentes formulaciones de MPC. Sin embargo, en este trabajo sólo se hará referencia a los resultados obtenidos en la segunda parte de las investigaciones realizadas que comprenden aquella relacionada con MPC. Al haber revisado todo el estudio se llega a la conclusión de que los ensayos realizados con MPC dan resultados mucho más satisfactorios que los realizados con cemento portland ordinario.

Según el estándar del CEM I 52.5R, que corresponde a un cemento portland de clase resistente 52.5 N/mm² y de alta resistencia inicial, se usaron agregados de sílice y agua destilada para la producción de muestras. Los aditivos utilizados para la fabricación de las muestras de CPO fueron ácido bórico (H₂BO₂) y ácido oxálico (C₂H₂O₄ · 2H₂O) como ácido débil y fuerte, respectivamente. Básicamente, el ácido bórico actúa como retardador, llegando a detener el proceso de hidratación cuando las concentraciones son más grandes del 2%. Sin embargo, el ácido oxálico desempeña un papel como un reductor hídrico. Las concentraciones más grandes de 0,1% aceleran la hidratación del aluminato y retardan la hidratación de los silicatos después [20].

Por otra parte, se usaron tres compuestos para producir muestras de MPC. Estos materiales cementosos se producen principalmente como una mezcla de óxido de magnesio y una fuente de fosfato. Para esta investigación, se empleó óxido de magnesio con baja reactividad (MgO), fosfato de amonio dihidrógeno (ADP, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) y bórax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), como un retardador.

Para el cemento de fosfato de magnesio, después de la selección de diferentes relaciones de P/M, los tests de conglomerante hidráulico, se llevaron a cabo las pastas de cemento y morteros. En primer lugar, la densidad real del aglutinante hidráulico (sin bórax) se determinó por medio de un picnómetro de líquido [21]. Posteriormente, se llevaron a cabo los experimentos para obtener consistencia normal, los tiempos de fraguado y estabilidad de volumen de pasta de cemento [22]. Entonces, se probó la consistencia del mortero fresco por medio de tablas de UNE-EN 1015-3:2000, así como el calor de hidratación durante el ajuste. La temperatura máxima de los morteros no debe exceder de 75°C y se realizó una prueba anterior para determinar el parámetro. Debido a la configuración de endurecimiento rápido de las muestras, la resistencia a la compresión se pudo determinar a la edad de 1 h, y además a los 1, 2, 7 y 28 días. La contracción de secado se midió hasta 200 días. Finalmente, un análisis químico también se llevó a cabo.

3.4. Resultados relacionados con el hormigón de fosfato de magnesio (MPC).

Como se ha comentado previamente, el MPC puede estar formado por diferentes compuestos y también la relación entre ellos puede cambiar. Con esto, se llevó a cabo una evaluación entre cinco relaciones diferentes entre P/M y el cemento Portland.

3.4.1. pH y densidad verdadera.

Se muestran la evolución de pH hasta los 28 días con un 0% a un 6% de bórax en la **Figura 3.3**. Este aglutinante tiene un carácter ligeramente ácido muy evidente, con un pH entre 5,5 y 7 para todas las muestras. Además, el gráfico muestra que el pH disminuye a medida que la relación P/M aumente, probablemente debido al pH inicial de cada compuesto. Teniendo en cuenta que la tendencia se mantiene en ambos gráficos, con y sin adición de bórax, los cambios en el pH pueden ser consecuencias de relación P/M. Si embargo, las variaciones en el porcentaje de adición también podrían afectar en el pH de la mezcla.

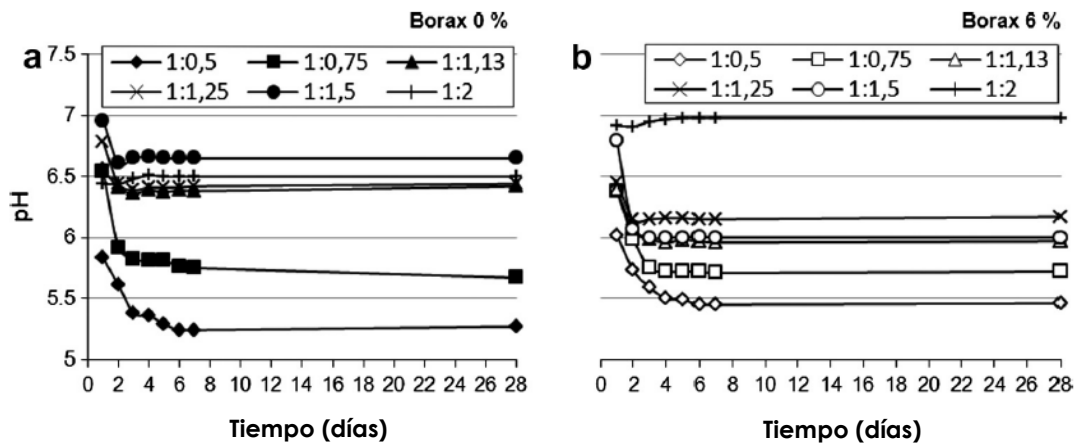


Figura 3.3 [Evolución en tiempo del pH para muestras con diferente relación de P/M con (a) 0% borax y (b) 6% borax.]

3.4.2. La consistencia normal, tiempos de fraguado y estabilidad de volumen.

La **Tabla 3.1** muestra los resultados de consistencia normal, los tiempos de fraguado y estabilidad de volumen de las pastas de cemento. La consistencia normal presenta una diferencia entre las muestras no superiores a $1,7 \pm 0,5\%$. Por otra parte, los valores observados en los morteros MPC estaban notablemente menor que el valor de referencia para el CEM I 52,5 R. Las diferencias podrían ser causa del efecto fundente de bórax, así como una cantidad estequiométrica menor de agua necesaria para el proceso de hidratación.

| P/M ratio | [Borax] (% w/w) | Consistencia (%) | Tiempo de fraguado | | Estabilidad volumétrica (mm) |
|-----------|--------------------|---------------------|--------------------|-----------------|---------------------------------|
| | | | inicial (min) | final (min) | |
| 1:1 | 6 | $6,4 \pm 0,5$ | 16 | 20 | 0,5 |
| 1:1,25 | | $6 \pm 0,5$ | 20 | 24 | |
| 1:1,5 | | $6,4 \pm 0,5$ | 21 | 24 | |
| 1:1,75 | | $7,4 \pm 0,5$ | 16 | 18 | |
| 1:2 | | $8,1 \pm 0,5$ | 16 | 19 | |
| OPC | - | $25-35 \pm 0,5$ | 110 (mínimo 45) | 70 (máximo 72C) | máx. 10 |

Tabla 3.1. [Resultados de consistencia normal, tiempos de fraguado y estabilidad volumétrica de muestras de MPC y CPO (CEM I 52,5 R) como referencia.] Elaboración propia.

Posteriormente se determinaron los tiempos de fraguado. Las muestras de MPC presentaron tiempos notablemente más cortos de fraguado que las de CPO, llegando a unos tiempos finales de fraguado más cortos de 30

min. Además, las diferencias observadas entre los tiempos de fraguado inicial y final eran siempre de menos de 5 minutos. Los factores que influyen en el tiempo de fraguado son principalmente la reactividad del magnesio, la finura del MgO, la relación A/C, la cantidad de retardador y la relación P/M. Por último, los resultados obtenidos para la estabilidad de volumen no mostraron diferencias significativas entre muestras con diferentes relaciones de P/M, En todos lo casos, los valores de estabilidad de volumen estaban cerca de cero, siendo 10 mm un valor aceptable para la pasta de cemento CEM I 52,5 R.

3.4.3. Resistencia a compresión y contracción por secado.

La **Figura 3.4** presenta los resultados de resistencia a compresión de las muestras de MPC en comparación con la referencia. Los valores der referencia muestran una tendencia creciente que debe alcanzar e máximo de alrededor de 60 MPa a los 28 días. Con respecto a las muestras de MPC, la resistencia a compresión en 1 h se encuentra en un rango de entre 2 y 8,3 MPa para las muestras con mayor y menor relación de P/M, respectivamente. Por otra parte, la evolución de la resistencia a la compresión es más rápido para estas muestras, llegando al 70% de la resistencia a compresión final en 1 día. Esto está relacionado con el comportamiento del fraguado rápido. Además, se sabe que se necesita un exceso de MgO con el fin de garantizar un buen desarrollo de la resistencia.

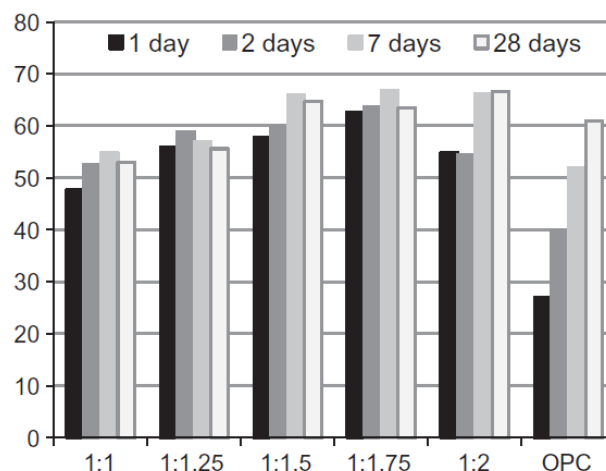


Figura 3.4 [Resistencia a compresión para muestras de MPC y CPO como referencia.]

La última prueba física llevada a cabo fue la contracción por secado de las muestras con una relación P/M 1:1,25 y 1:2. Se llevo a cabo un

estudio de curado al aire y otro de curado con agua. Los resultados mostraron que en general, las muestras CPO muestran una contracción de curado al aire y una ligera expansión de curado con agua. Las muestras de MPC mostraron una menor contracción y expansión que la referencia con la única excepción de las muestras con una relación P/M inferior a 1:1,25. Estas muestras presentan una mayor expansión que la referencia durante el curado hasta los 200 días.

Del estudio se desprendió que a medida que la concentración de MgO aumenta, las muestras presentan una mejor estabilidad de volumen. Los resultados a los 200 días mostraron una contracción menor que la muestra de referencia a los 67 días, siendo este hecho un logro positivo. Por último, se piensa que la retracción en muestras de MPC podría ser causa del secado o la contracción autógena. Además, la expansión puede ser consecuencia de la hidratación de los componentes anhidros del cemento así como la formación de compuestos intermedios por la incorporación de agua.

3.5. Conclusiones.

En las investigaciones que se han llevado a cabo en busca de un hormigón biológico se han presentado diferentes métodos para desarrollar un material de cemento de bajo pH. Para ello, se llevaron a cabo diversos ensayos para disminuir el pH del CPO y la caracterización de MPC para evaluar su idoneidad. Aunque no se haya realizado un desarrollo detallado en el presente trabajo, se descartó el uso de CPO con adiciones de ácido, ya que los resultados obtenidos eran en la totalidad de los ensayos realizados, y con carácter general las prestaciones del material, menos satisfactorios que el primero. El pH final no era lo suficientemente baja como para que el material se pudiera utilizar como un soporte biológico, y el impacto negativo sobre las propiedades de las muestras, la mayoría propiedades mecánicas, fueron las principales razones para el rechazo.

Sin embargo, la caracterización MPC mostró diferentes propiedades interesantes de este material. En primer lugar, el intervalo de pH es aceptable de acuerdo con la aplicación (5,8 y 7) y comparativamente a CPO (CEM I 52.5R), MPC requiere menores cantidades de agua para la hidratación. En consecuencia, este hecho es positivo con el fin de reducir las cantidades de agua en la producción industrial. Sin embargo, se observó una demanda de agua un poco más grande para las muestras de menor relación P/M que para los mayores. Por lo tanto, se obtuvieron tiempos de fraguado más bajos, siendo cada vez inferior a medida que la relación P/M también lo era. Además, se obtuvieron buenos resultados para la estabilidad de volumen. Los resultados eran constantes con independencia de relación P/M y significativamente menor que el límite máximo para CPO. Por otra parte, el análisis químico dio

una idea acerca de diferentes compuestos presentes en la muestra, incluyendo el porcentaje y productos cristalinos después del proceso de hidratación. No se observó presencia de compuestos peligrosos para la salud humana o para la durabilidad estructural.

En resumen, con el fin de producir un material de cemento de bajo pH en cumplimiento de los requisitos de uso, el mortero MPC es el aglutinante más adecuado. Su pH está más cerca de la neutralidad con independencia de la relación P/M dentro del intervalo estudiado. Por otra parte, es importante señalar que relaciones bajas de P/M son más interesantes debido a mejores propiedades físico-mecánicas, así como desde el punto de vista económico.

4. Otros hormigones.

A continuación se tratan brevemente algunos de los nuevos hormigones que se están desarrollando en la actualidad y que resultan de interés para la aplicación en estructuras de arquitectura e ingeniería civil. Son materiales que todavía no están completamente desarrollados o existe poca información acerca de ellos o las investigaciones que se están realizando. Sin embargo, sirve para hacernos una idea de hacia dónde llevan los estudios de estos nuevos materiales de construcción.

4.1. Hormigón flexible.

Se trata de un nuevo hormigón desarrollado por Victor Li, profesor de ingeniería civil y ambiental de la universidad de Michigan. Este nuevo hormigón mucho más resistente y flexible, como se puede apreciar en la **Figura 4.1**, apenas produce fisuras y si lo hace puede repararse por sí mismo. Podríamos considerar que se trata de un subtipo de hormigón autorreparable, pues aplica una tecnología similar a la que ya se ha visto en el primer capítulo del presente trabajo, pero con una tecnología añadida, consistente en unas pequeñas microfibras, que implementa sus funciones. Se conoce como Engineered Cement Composite (ECC) y mejora en varios parámetros las características del cemento tradicional. Adquiere su capacidad de flexión debido a que en lugar de producirse una gran apertura o fisura, se producen una serie de fisuras más pequeñas que el propio material es capaz de reparar. No es necesaria la intervención humana en este proceso de reparación, basta con que el agua y el dióxido de carbono hagan el trabajo reparador. Solo basta con que las fisuras se mantengan por debajo de 150 micrómetros (mejor por debajo de 50) para que la curación sea completa.



Figura 4.1 [Pieza de ECC trabajando a flexión].

Este nuevo hormigón, ECC, se dobla sin romperse debido a que está protegido con ciertas fibras recubiertas que lo mantienen unido. Este hecho hace que permanezca en las mismas condiciones de seguridad cuando se deforma hasta un cinco por ciento más de su tamaño inicial. Además este hormigón puede pesar hasta un cuarenta por ciento menos. Contiene pequeñas fibras embebidas en el polímero alcohol poli vinílico, de unos 8-12 milímetros de largo y 40 micras de diámetro, algo equivalente a la mitad del grosor de un cabello humano. Tiene un recubrimiento superficial de unos nanómetros de espesor que hace permita doblarse en lugar de romperse bajo cargas muy pesadas.

Si el material sufriese un movimiento con la apertura de una fisura de dimensiones grandes no sería capaz de auto repararse, pero sin embargo ante movimientos pequeños, este hormigón es capaz de cerrar las fisuras, y que sus propiedades mecánicas no se vean afectadas una vez acabado el proceso de auto-reparación. Verdaderamente, habría que saber exactamente a qué propiedades mecánicas se refiere, ya que en caso de producirse una fisura que no solo afectara a la parte superficial de la viga, sino que la atravesase de un extremo al otro, se crearía un plano de rotura, que aunque fuese reparado, sería, mucho más vulnerable a acciones del cortante, creando así un plano de desplazamiento (aunque debemos tener en cuenta que las vigas, por lo general, van armadas y esto no supondría un gran problema). **Figura 4.2.** La cuestión es saber en un caso de estos, qué adherencia tiene este "pegamento" que crea de manera natural el cemento, con respecto a las dos caras que tiene que unir. [23]



Figura 4.2 [Plano de desplazamiento generado por una fisura].

Este material tiene una resistencia a compresión muy similar a la del hormigón normal. Pero mientras que el hormigón ordinario tiene que una capacidad de resistir tensiones del orden del 0,1 por ciento respecto a su capacidad de resistencia a compresión, el ECC tiene una capacidad de tensión del 3 al 5 por cien, o lo que es lo mismo entre unas 300 y 500 veces más,

haciéndolo mucho más dúctil y flexible como se puede comprobar en la **Figura 4.3** correspondiente a los ensayos de flexibilidad llevados a cabo.

Su fórmula asegura que cuando está expuesto en la superficie de las fisuras puede reaccionar con el agua y el dióxido de carbono del aire y formar una fina cicatriz blanca de carbonato de calcio. En el laboratorio, el material requiere entre uno y cinco ciclos de humedecimiento y secado para estar reparado. Para probar que el hormigón había curado sus fisuras, los investigadores utilizaron mediciones de frecuencia de resonancia para determinar la rigidez y la fuerza antes y después de la inducción de las fisuras. Estas pruebas enviaron ondas sonoras a través del material para detectar cambios en su estructura. [24]

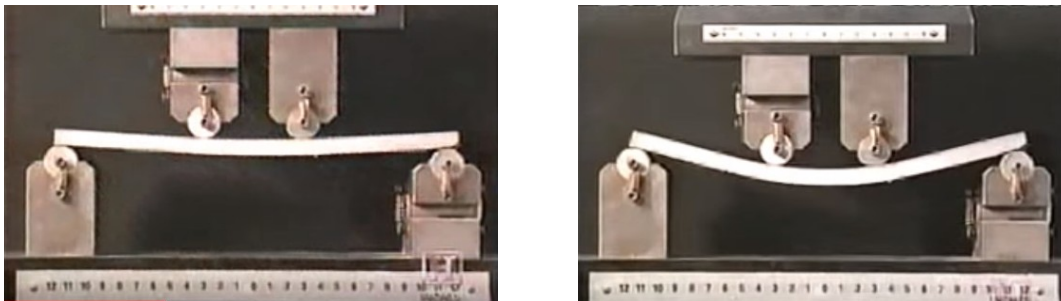


Figura 4.3 [Ensayos de flexibilidad del hormigón].

En la actualidad, los constructores refuerzan las estructuras de hormigón con barras de acero embebidas en el hormigón para mantener las fisuras tan pequeñas como sea posible. Pero lo cierto es que, pese a todo, no son lo suficientemente pequeñas como para evitar que el agua o el hielo penetren y dañen el acero, debilitando la estructura. El hormigón de Li, sin embargo, no necesita el refuerzo de acero para mantener las fisuras pequeñas, por lo que la corrosión antes descrita ya no se produce.

4.2. Hormigón ecológico.

Como ya se ha expuesto anteriormente, el hormigón no es un material natural que se pueda encontrar en el medio natural listo para ser empleado en la construcción. Por tanto, para su fabricación, ya sea de este o de alguno de los componentes que los conforman, necesita de una serie de procesos. Entre ellos, cabe destacar que la fabricación de cemento para hormigón consiste en calentar piedra caliza pulverizada, arcilla y arena a una temperatura aproximada de 1.500°C, usando combustible como el carbón o el gas natural.

Durante este proceso genera en las plantas productoras de cemento (**Figura 4.4**) una gran cantidad de dióxido de carbono que se emite a la atmosfera. La fabricación de una tonelada de métrica de cemento Portland de uso general libera entre 650 y 920 kilogramos de este componente. Los 2,8 millones de toneladas métricas de cemento producidas en todo el mundo en 2009 generaron alrededor del 5 por ciento de todas las emisiones de dióxido de carbono. [25]



Figura 4.4 [Fábrica de cemento, Buñol (izquierda). Cementera de la empresa CEMEX (derecha).]

Nikolaos Vlasopoulos, científico jefe en la startup Novacem, con sede en Londres, está tratando de eliminar las emisiones con un cemento que absorba más dióxido de carbono del que libera durante su fabricación. Logra retener hasta 100 kilogramos de gas de efecto invernadero por tonelada. Vlasopoulos descubrió la receta del cemento mientras investigaba cementos producidos por la mezcla de óxidos de magnesio con cemento Portland mientras estudiaba en el Imperial College de Londres. Sin embargo, al añadir agua a los compuestos de magnesio sin ningún tipo de Portland en la mezcla, descubrió que aún así se puede hacer un tipo de cemento sólido que no esté basado en piedra caliza rica en carbono. A medida que se endurece, el dióxido de carbono en la atmósfera reacciona con el magnesio para crear carbonatos fortalecedores del cemento que, al mismo tiempo ayudan a la captura del gas.

Los cinco bloques de la **Figura 4.5** corresponden a diferentes variedades de hormigón hecho con el nuevo tipo de cemento de Novacem. Los compuestos de magnesio forman parte de los componentes básicos, reemplazando a la piedra caliza, un mineral utilizado tradicionalmente para hacer cemento Portland. Los cementos se mezclan con arena, grava y agua para hacer hormigón. Variando las proporciones del ingrediente y la adición de otros materiales, tales como vidrio, puede producir diferentes tipos de

hormigón para diferentes aplicaciones. Conforme el cemento de se endurece, se absorbe el dióxido de carbono de la atmósfera.

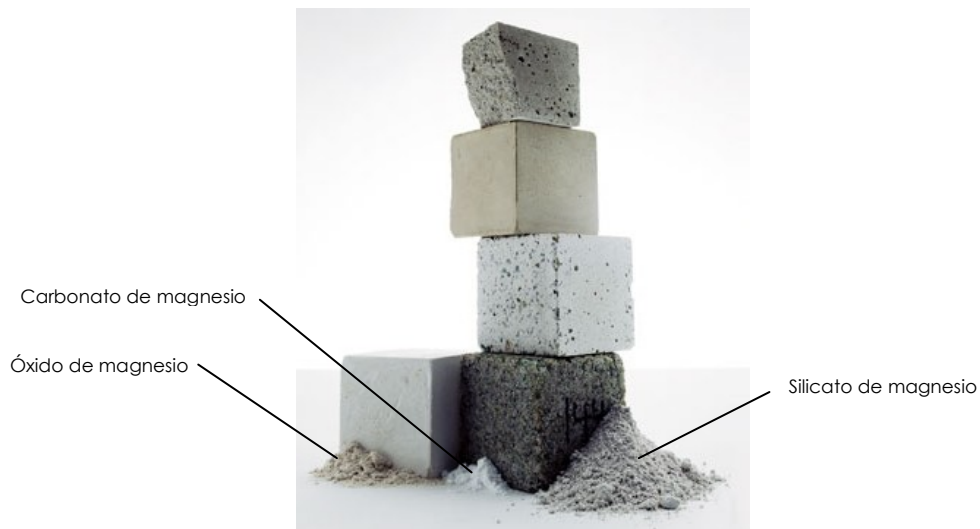


Figura 4.5 [Productos Novacem.] Elaboración propia.

Otra empresa que también trata de reducir la huella de carbono de la producción de cemento es Calera, en Los Gatos (California). Sin embargo, estos cementos de Calera se encuentran actualmente destinados a ser aditivos para el cemento Portland en lugar de reemplazarlo. Durante el verano de 2008, el profesor de la Universidad de Stanford, Brent Constantz, comenzó con la fabricación de un cemento a partir de gas de combustión y el agua de mar en la instalación de gas de Dynegy, proceso en la **Figura 4.6**. En un primer momento, Constantz, espera poder sustituir el cemento Portland y que este produce una gran cantidad de dióxido de carbono. Sin embargo, ahora se especula con la posibilidad de que pueda utilizarse un agregado de piedra sintética Calera, arena y grava para la captura de CO₂ e invertir las ganancias netas. En el World of Concrete Show del año siguiente, durante un seminario, Constantz aseguró que podría ser utilizado para reemplazar al cemento Portland, aunque no era seguramente esencial. "La forma de producirlo es probablemente aceptable, a través del conglomerado", aseguró. [26]

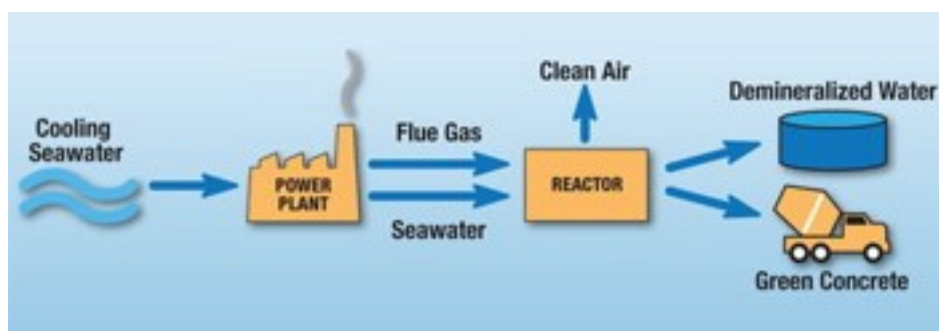


Figura 4.6 [Proceso de producción de Calera]

El tipo de carbonato cálcico que produce Calera imita la forma del carbonato que los organismos marinos emplean para formar sus conchas y estructuras. Esta forma especial de carbonato cálcico es un aglutinante que crea estructuras con alta resistencia y tenacidad.

El carbonato de calcio presenta polimorfismo con tres poliformas en la naturaleza: la vaterita, la calcita y el aragonito. El proceso Calera resulta en la producción de la poliforma vaterita, que es estable cuando se almacena en ausencia de agua. Cuando se añaden agua y otros aditivos a la poliforma vaterita, se produce una reacción en la que la vaterita se transforma a través de una reacción de disolución y precipitación para formar otra poliforma de carbonato de calcio conocida como aragonito. Esta conversión de vaterita a aragonito da como resultado un material con alta resistencia, como se puede apreciar en la **Figura 4.7**. Ocurre igual que en diversos sistemas naturales como el nácar, que también se construyen a partir de la poliforma aragonito de carbonato de calcio.

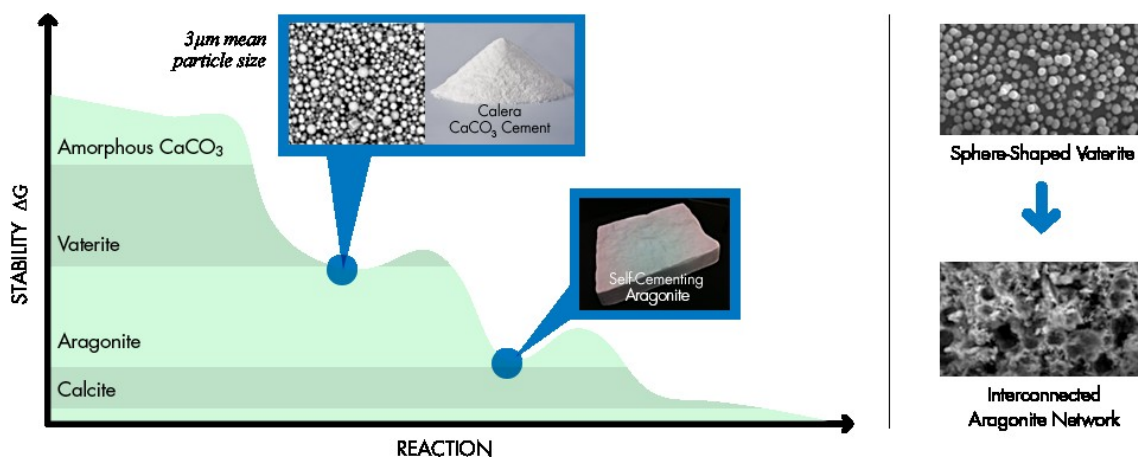


Figura 4.7 [Proceso conversión varetita en aragonita.]

4.3. Bloque de hormigón antisísmico.

Pese a que tiene una gran influencia en el comportamiento sísmico de un edificio, la tabiquería interior que compartimenta las viviendas no suele estar considerada como un elemento estructural, por lo que suele quedar fuera de la normativa sismorresistente. Esta conducta puede llevar a fallos estructurales no previstos inicialmente. El Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) ha buscado aislar la tabiquería interior de la estructura del edificio mediante un dispositivo que se compone de un ladrillo o bloque de hormigón antisísmico." Está formado por una matriz cuya especial formulación le confiere propiedades para conseguir

el aislamiento sísmico buscado. A esto también contribuyen los elementos insertados en su matriz, dotándolo de mejoradas propiedades para el comportamiento fuera del plano." [27]

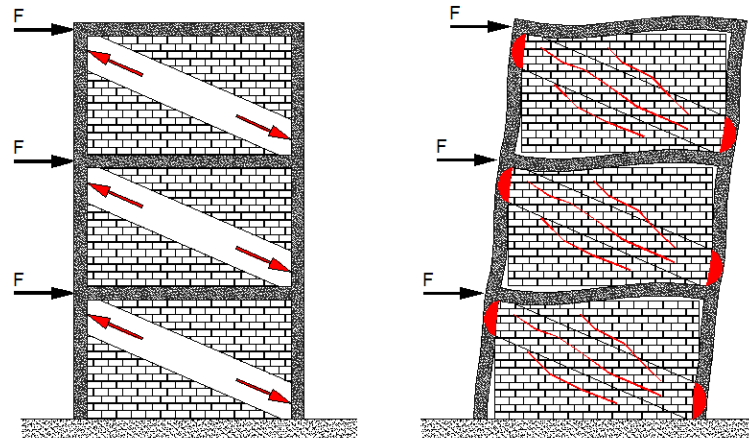


Figura 4.8 [Deformación del pórtico coaccionado por la tabiquería interior. (Izquierda) Bielas diagonales de compresión actuando sobre cabeza y base de columnas. (Derecha) Daños habituales en pilares y tabiquería.]

Cuando se produce un movimiento sísmico se produce un desplazamiento horizontal relativo entre plantas contiguas que se conoce como deriva o 'drift' (**Figura 4.8**). Este nuevo dispositivo permite absorber estos movimientos y facilitando los giros de los nudos. De esta forma, la estructura presenta una menor rigidez entre la estructura de hormigón y la tabiquería interior e impide la formación de las bielas de compresión que dañan la estructura y los cerramientos.

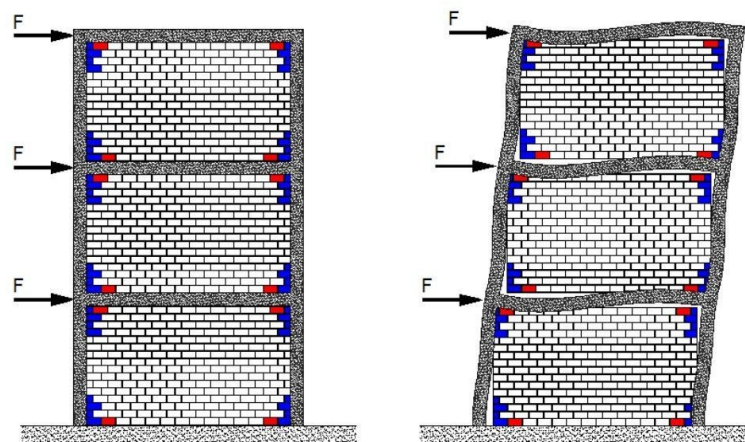


Figura 4.9 [Deformación del pórtico ante fuerzas horizontales utilizando ladrillo aislador sísmico SISBRICK. Protección de pilares y tabiques.]

En la **Figura 4.9** se puede apreciar que el sistema se divide en dos componentes principalmente. Por un lado, los bloques marcados en azul que se encargan de absorber los movimientos horizontales y están en contacto con los pilares. Por otro, los bloques marcados en rojo que se encargan de absorber los movimientos verticales y están en contacto con las vigas. Estos bloques se colocan de manera tradicional, como si se trataran de bloques convencionales o ladrillos cerámicos. Además, este sistema se puede emplear para elementos de tabiquería no completa, como indica la **Figura 4.10**, y evitar así la formación de pilares cortos y todos los problemas y patología que pueden derivar de ellos (**Figura 4.11**).

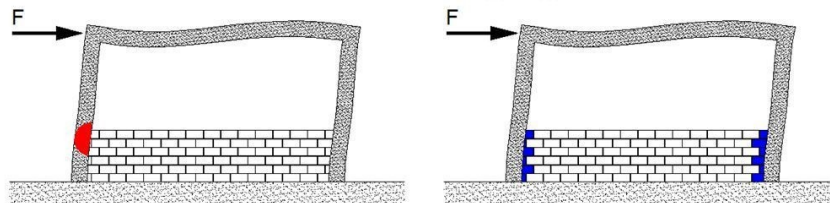


Figura 4.10 [(Izquierda) Creación de pilar corto y daño en el mismo por tabiquería incompleta. (Derecha) Protección de pilares cortos utilizando SISBRICK.]



Figura 4.11 [(Izquierda) Rotura por cortante en cabeza pilar debido a biela de compresión por sismo. (Derecha) Rotura en cabeza de pilar por efecto de corte de la tabiquería (bielas diagonales) y tabique dañado.]

5. Índice imágenes.

Figura 1.1 (Izquierda)[Hess]. (s.f.). Hess | Pumice: Hess Pozz reduce la reacción álcali-sílice (ASR) por muy poco dinero. Recuperado de: http://www.hesspumice.com/_spanish/pumice-pages/pumice-uses/pumice-pozzolan-mitigates-asr.html (Derecha) [Cervantes Vélez, Carlos Eduardo] (2009, marzo) Fisuras en el hormigón. Recuperado de <http://fisurasjarata.blogspot.it/>

Figura 1.2 [Mostafa Seifan; Ali Khajeh Samani; Aydin Berenjian] (2016 enero 29) Appl Microbiol Biotechnol (2016) 100:2591-2602. Recuperado de: *Bioconcrete: next generation of self-healing concrete*.

Figura 1.3 (Izquierda) [Wikipedia] (2009, marzo 30) Wikipedia: Bacillus anthracis. Recuperado de: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bacillus_anthraxis_Gram.jpg (Centro) [Wikipedia] (2010, septiembre 14) Wikipedia: Arthrobacter. Recuperado de: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a2/SEM_of_Arthrobacter_chlorophenolicus.jpg (Derecha) [Wikipedia] (2014, Julio 13) Wikipedia: Rhodococcus. Recuperado de: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rhodococcus>

Figura 1.4 [Mostafa Seifan; Ali Khajeh Samani; Aydin Berenjian] (2016 enero 29) Appl Microbiol Biotechnol (2016) 100:2591-2602. Recuperado de: *Bioconcrete: next generation of self-healing concrete*.

Figura 2.1 (Izquierda) [Dubai Sports City's Cricket Stadium, Dubai] (s.f.) Recuperado de: http://media.gettyimages.com/photos/side-view-of-cricket-stadium-in-sports-city-dubai-uae-pictureid559153427?k=6&m=559153427&s=170667a&w=0&h=1m_jkJtibOZaRu42ekGL30H8IbK6lC6oKvDminZiE2U= (Derecha) [Augustin, Samuel] (2014, abril 14) Planet Den: All about National Centre for the Performing Arts (National Grand Theatre) Beijing RTP Recuperado de: <http://planetden.com/wp-content/uploads/2014/04/architecture.jpg>

Figura 2.2 [Siti Norsaffirah Zailan; Norsuria Mahmed; Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah; Andrei Victor Sandu] (2016) *Materials Science and Engineering* 133 Recuperado de: *Self-cleaning geopolymers concrete*.

Figura 2.3 [Siti Norsaffirah Zailan; Norsuria Mahmed; Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah; Andrei Victor Sandu] (2016) *Materials Science and Engineering* 133 Recuperado de: *Self-cleaning geopolymers concrete*.

Figura 2.4 [PVT] (s.f.) PVT. Recuperado de: <http://www.pvt.es/wp-content/uploads/2016/05/logo-ecogranic-300x113.png>

Figura 2.5 [InnDEA Valencia] (2015, marzo 15) VIT ENERGIA VALENCIA. Recuperado de: <http://www.vitenergia.es/?noticias=proyectos-europeos-el-piloto-de-light2cat-en-valencia-en-marcha>

Figura 3.1 (Izquierda) [González Prieto, María] (2015, noviembre 30) Madrid + barato: Caixa Forum. Recuperado de: <http://www.madridmasbarato.com/2015/11/30/caixa-forum-madrid-jardin-vertical-exposiciones/> (Derecha)[Poirot, Luis; Wenborne, Guy] (2014, abril 1) Plataforma arquitectura: En detalle: Jardines verticales. Recuperado de: <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-349031/en-detalle-jardines-verticales>

Figura 3.2 Elaboración propia.

Figura 3.3 [Manso, Sandra] (2014, mayo) Bioreceptivity optimisation of concrete substratum to stimulate biological colonisation. (Tesis doctoral por la UPC) Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/262938554>

Figura 3.4 [Manso, Sandra] (2014, mayo) Bioreceptivity optimisation of concrete substratum to stimulate biological colonisation. (Tesis doctoral por la UPC) Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/262938554>

Figura 4.1 [Ingeniería pretensada] (2011, abril 22) Ingeniería pretensada: Hormigón autoreparable. Recuperado de: <http://ingenieriapretensada.blogspot.com.es/2011/04/hormigon.html>

Figura 4.2 [Ingeniería pretensada] (2011, abril 22) Ingeniería pretensada: Hormigón autoreparable. Recuperado de: <http://ingenieriapretensada.blogspot.com.es/2011/04/hormigon.html>

Figura 4.3 [ACEMRL]. (2010, mayo 10). ECC on History : Modern marvels [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=2zU0mUggZN4>

Figura 4.4 (Izquierda): [Ferrer, José]. (s.f.). Levante-emv: Fábrica de buñol. Recuperado de <http://www.levante-emv.com/economia/2008/10/18/cemex-desconoce-impacto-despido-6000-trabajadores-plantas-espana/508157.html> (Derecha): [Piqueras Yepes, Víctor]. (2014, noviembre 8). Proyecto de investigación Horsost: ¿Cuánto CO2 se emite cuando fabricamos hormigón? Recuperado de <http://horsost.blogs.upv.es/2014/11/08/cuanto-co2-se-emite-cuando-empleamos-hormigon/>

Figura 4.5 Elaboración propia.

Figura 4.6 [Van Hampton, Tudor]. (2009, febrero 20). Aggregate research: New green concrete process combines seawater, flue gas. Recuperado de <https://www.aggregateresearch.com/news/new-green-concrete-process-combines-seawater-flue-gas/>

Figura 4.7 [Calera] (s.f.) Calera: Science. Recuperado de: <http://www.calera.com/beneficial-reuse-of-co2/science.html>

Figura 4.8 [AC Ingeniería y Arquitectura] (2016, enero 15) La UPV desarrolla un ladrillo antisísmico. Recuperado de: <http://www.grupoingenieria.com/la-upv-desarrolla-un-ladrillo-antisismico/>

Figura 4.9 [Estructurando] (2016, enero 11) La UPV desarrolla un ladrillo antisísmico. Recuperado de: <http://estructurando.net/2016/01/11/la-upv-desarrolla-un-ladrillo-antisismico/>

Figura 4.10 [SISBRICK] (s.f.) SISBRICK: Aislador antisísmico. Recuperado de: <http://sisbrick.com/>

Figura 4.11 [Estructurando] (2016, enero 11) La UPV desarrolla un ladrillo antisísmico. Recuperado de: <http://estructurando.net/2016/01/11/la-upv-desarrolla-un-ladrillo-antisismico/>

6. Referencias

- [1] Le Métayer-Levrel G, Castanier S, Oriol G, Loubière JF, Perthuisot JP (1999) Applications of bacterial carbonatogenesis to the protection and regeneration of limestones in buildings and historic patrimony. *Sediment Geol* 126:25–34
- [2] Cailleux E, Pollet V (2009) Investigations on the development of selfhealing properties in protective coatings for concrete and repair mortars. 2nd International Conference on Self-Healing Materials, Chicago, USA
- [3] Hearn N (1998) Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference? *Mater Struct* 31:563–567
- [4] Dry C (1994) Matrix cracking repair and filling using active and passive modes for smart timed release of chemicals from fibers into cement matrices. *Smart Mater Struct* 3:118–123
- [5] Rivadeneyra MA, Delgado R, Del Moral A, Ferrer MR, Ramos-Cormenzana A (1994) Precipitation of calcium carbonate by *Vibrio* spp. from an inland saltern. *FEMS Microbiol Ecol* 13: 197–204
- [6] Castanier S, Metayer-Levrel GL, Perthuisot J (2000) Bacterial roles in the precipitation of carbonate minerals. In: Riding RE, Awramik SM (eds) *Microbial sediments*. Springer, Berlin Heidelberg, pp. 32–39
- [7] Mann S (2001) *Biomineralization: principles and concepts in bioinorganic materials chemistry*. Oxford University Press, New York
- [8] Sangadji S, Schlangen E (2013) Mimicking bone healing process to self repair concrete structure novel approach using porous network concrete. *Procedia Engineering* 54:315–326
- [9] Jonkers HM, Thijssen A, Muyzer G, Copuroglu O, Schlangen E (2010) Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecol Eng* 36:230–235
- [10] Wang J, Van Tittelboom K, De Belie N, Verstraete W (2012) Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. *Construction Building Materials* 26:532–540
- [11] Achal V, Mukherjee A, Sudhakara Reddy M (2011) Microbial concrete: way to enhance the durability of building structures. *J Mater Civil Eng* 23:730–734
- [12] S. H. Saani and R. B. Khadiranaikar. (2013) *International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 366-371.
- [13] A. Khitab, M. Alam, H. Riaz, and S. Rauf. (2014) *International Journal of Advances in Life Science and Technology*, vol. 4, pp. 47-53.

[14] P. Duan, C. Yan, W. Luo and W. Zhou. (2016) Construction and Building Materials, vol. 106, pp. 115-125.

[15] R. Khataee, V. Heydari, L. Moradkhannejhad, M. Safarpour and S. W. Joo, (2013) Journal of Nanoscience and Nanotechnology, vol. 13, pp. 1-6.

[16] PVT (2016, septiembre 20) Fabricantes de losas y piezas de hormigón para pavimentos exteriores [en línea]. Disponible en: <http://www.pvt.es/ecogranic/>

[17] SERVIMEDIA (2016, octubre 24). RTVE: El CO₂ atmosférico rebasa por primera vez el umbral simbólico de 400 partes por millón. Recuperado de <http://www.rtve.es/noticias/20161024/co2-atmosferico-rebasa-primer-vez-umbral-simbolico-400-partes-millon/1430961.shtml>

[18] Guillitte O. (1995). Bioreceptivity: a new concept for building ecology studies. The science of Total Environment 167(1995), pp. 215–220.

[19] Li Z, Ding Z, Zhang Y. (2004). Development of sustainable cementitious materials. Proceedings of the international workshop on sustainable development and concrete technology. USA: Center for Transportation Research and Education, Iowa State University. pp. 55–76.

[20] Taylor HFW. (1990). Cement chemistry. London: Academic Press Inc.

[21] UNE 80105:1986. (1986). Test methods of cements. Physical analysis. Density determination by the liquid displacement pycnometer, AENOR

[22] UNE-EN 196-3:2005. (2005). Methods of testing cement – Part 3: Determination of setting times and soundness, AENOR; 2005.

[23] Hormigón auto-reparable. (2011, abril 22) Hormigón auto-reparable. Madrid, España: Ingeniería pretensada. Recuperado de <http://ingenieriapretensada.blogspot.it/2011/04/hormigon.html>

[24] Sánchez Mosquete, Jorge. (s.f.) Hormigón flexible y autorreparable de Victor Li. Extremadura, España: Mosingenieros.com. Recuperado de <http://www.mosingenieros.com/2010/01/hormigon-auto-reparable.html>

[25] Domoterra. (2013, abril 2) El cemento y la producción de CO₂ Recuperado de <http://www.domoterra.es/blog/2013/04/02/el-cemento-y-la-produccion-de-co2/>

[26] Van Hampton, Tudor. (2009, febrero 20). New green concrete process combines seawater, flue gas. Las Vegas, Nevada: Aggregate research.com. Recuperado de <https://www.aggregateresearch.com/news/new-green-concrete-process-combines-seawater-flue-gas/>

[27] SISBRICK (s.f.) SISBRICK Aislador sísmico: ¿Qué es SISBRICK? Recuperado de: <http://sisbrick.com/ladrillo-aislador-sismico-sisbrick-informacion-tecnica/que-es-sisbrick>

7. Bibliografía y enlaces web

[Mostafa Seifan; Ali Khajeh Samani; Aydin Berenjian] (2016 January 29) *Appl Microbiol Biotechnol* (2016) 100:2591-2602. Recuperado de: *Bioconcrete: next generation of self-healing concrete*.

[Hilloulin, Benoit; Van Tittelboom, Kim; Gruyaert, Elke; De Belie, Nele; Loukili, Ahmed] (2015, enero) *Cement and Concrete Composites* vol.55, pp.298-307 Recuperado de: *Design of polymeric capsules for self-healing concrete*.

[Wu, Min ; Johannesson, Bjorn ; Geiker, Mette] (2012, marzo) *Construction and Building Materials* vol. 28 (1) Recuperado de: *Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material*.

PVT – Fabricantes de losas y piezas de hormigón para pavimentos exteriores [en línea]. [Fecha de consulta: 20 de septiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.pvt.es/ecogranic/>

El País – La baldosa que disminuye la contaminación atmosférica [en línea]. [Fecha de consulta: 26 de junio de 2016]. Disponible en: http://elpais.com/elpais/2016/06/23/planeta_futuro/1466693329_441540.html

[Shen, Weiguo ; Zhang, Chuang ; Li, Qiu ; Zhang, Wensheng ; Cao, Liu ; Ye, Jiayuan] (2015, enero 15) *Journal of Cleaner Production*, vol.87, p. 762. Recuperado de: *Preparation of titanium dioxide nano particle modified photocatalytic self-cleaning concrete*

[Siti Norsaffirah Zailan; Norsuria Mahmed; Mohd Mustafa Al Bakri Abdullah; Andrei Victor Sandu] (2016) *Materials Science and Engineering* 133 Recuperado de: *Self-cleaning geopolymer concrete*.

[Diamanti, M.V.; Lollini, F.; Pedferri, M.P.; Bertolini, L.] (2013, abril) *Building and Environment*, vol. 62, pp.174-181. Recuperado de: *Mutual interactions between carbonation and titanium dioxide photoactivity in concrete*.

[Manso, Sandra] (2014, mayo) Bioreceptivity optimisation of concrete substratum to stimulate biological colonisation. (Tesis doctoral por la UPC) Recuperado de: <https://www.researchgate.net/publication/262938554>

<https://es.wikipedia.org>

<http://www.tudelft.nl>

<http://www.observatorioplastico.com>

<http://www.elconfidencial.com/tecnologia>

<http://www.labrujulaverde.com>

<http://es.euronews.com>

<http://www.vitenergia.es>
<http://inndeavalencia.com/>
<http://www.sciencedirect.com/>
<http://ingenieriapretensada.blogspot.com.es/2011/04/hormigon.html>
<http://www.mosingenieros.com/2010/01/hormigon-auto-reparable.html>
<http://www.progressiveengineer.com/profiles/victorLi.htm>
<http://www.livescience.com/244-bridges-bendable-concrete.html>
<http://www.americanscientist.org/issues/feature/can-concrete-be-bendable>
<http://cee.engin.umich.edu/self-healing-concrete>
<http://www.smithsonianmag.com/>
<https://www.technologyreview.com/>
<https://twenergy.com/>
<https://www.theguardian.com/>
<http://www.actionsustainability>
<http://horsost.blogs.upv.es/>
<http://www.technologyreview.es/>
<http://www.domoterra.es/>
<http://www.levante-emv.com/>
<http://sisbrick.com/>
<http://www.diariodelaconstruccion.cl/>
<http://estructurando.net/>