

Ciencia Nicolaita 85

ISSN: 2007-7068



Universidad
Michoacana
de San Nicolás
de Hidalgo

Estado del desarrollo y aplicaciones de la tecnología del concreto

Development status and applications of concrete technology

J.V. González-Aviña., L.G. López Yépez*, A. Durán-Herrera

Para citar este artículo: J.V. González-Aviña., L.G. López Yépez*, A. Durán-Herrera, 2022. Estado del desarrollo y aplicaciones de la tecnología del concreto. Ciencia Nicolaita no. 85, 27-43. DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi85.619>



Historial del artículo:

Recibido: 11 de marzo de 2022

Aceptado: 28 de mayo de 2022

Publicado en línea: septiembre de 2022



Ver material suplementario



Correspondencia de autor: llopezy@uanl.edu.mx



Términos y condiciones de uso: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



Envíe su manuscrito a esta revista: <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

Estado del desarrollo y aplicaciones de la tecnología del concreto

Development status and applications of concrete technology

J.V. González-Aviña., L.G. López Yépez*, A. Durán-Herrera

Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Civil, Departamento de la Tecnología del Concreto, Pedro de Alba S/N, Ciudad Universitaria, San Nicolás de los Garza, N.L., México.

Resumen

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción esto debido a la fácil consecución de los materiales que lo conforman y a su facilidad de fabricación. El estado actual de la tecnología de este material se ha podido alcanzar por la gran cantidad de trabajos desarrollados previamente en los diferentes materiales que lo integran, lo que ha permitido entender el funcionamiento de dichos componentes cuando al combinarse producen el concreto que se conoce hoy en día. En este trabajo se muestra la evolución del avance de los materiales con los cuales se fabrica el material hasta llegar a las características y aplicaciones de los concretos especiales que se usan actualmente.

Palabras clave: Tecnología del concreto, Concretos especiales, Componentes del concreto

Abstract

Concrete is one of the most used materials in the construction industry due to the easy availability of the materials that make it up and its easy manufacturing. The current status of the technology of this material has been achieved by the large number of works that have been previously developed in the different materials that compose it, which has allowed us to understand the operation of these components that, when they are mixed become the common known concrete. This work shows the evolution and changing materials in order to achieve manufactured material with characteristics and applications of the special concretes that are currently used.

Keyword: Concrete technology, special concrete, concrete compounds



1. Introducción

El concreto es uno de los materiales de construcción más antiguos y utilizado en el mundo (Kosmatka, 2016). Las razones de la permanencia del concreto a lo largo del tiempo han sido varias, pero entre las más importantes se encuentran la alta disponibilidad y el bajo costo de sus componentes. Además, la versatilidad y adaptabilidad del concreto han permitido, que el material pueda moldearse en una variedad de formas y tamaños para satisfacer requisitos arquitectónicos cada vez más retadores, y sus propiedades pueden ser optimizadas modificando su composición para cumplir con los requisitos ingenieriles. El concreto se ha considerado como un material que ha formado literalmente el “soporte” de nuestra sociedad moderna (Mindess, 2003), debido a que se puede decir con certeza que muchos de los logros de nuestra civilización han dependido de este material, al igual que muchos de los logros perdurables de las civilizaciones anteriores fueron posibles al uso de materiales cementantes que le precedieron al cemento portland con el que hoy en día se produce el concreto moderno. Aun hoy en día, las mejoras en el desempeño del concreto se basan en algunas tecnologías muy utilizadas por culturas antiguas, como lo son los materiales cementantes.

1.1 Desarrollo histórico de los cementantes

A lo largo de la historia del ser humano, se han utilizado una variedad de materiales cementantes de diferente naturaleza. Para darle una visión más clara sobre la importancia de los cementantes en el desarrollo de la Tecnología del Concreto, en este trabajo, se presenta una revisión del desarrollo de cementantes a base de compuestos de cal (cementos calcáreos), así como de los cementos hidráulicos que son aquellos cementos calcáreos que reaccionan químicamente con el agua para endurecerse y formar un producto resistente al agua, debido a que estos cementantes son los precursores del concreto moderno.

1.1.1 Cementos no-hidráulicos. Los primeros materiales cementantes calcáreos que se utilizaron fueron el yeso y la caliza. El primer uso de un “protoconcreto” se remonta al Neolítico, en una época en la

que los seres humanos vivían en cuevas naturales de piedra caliza (Malinowski, 1991). El descubrimiento de las propiedades cementantes de la cal, se dio probablemente cuando se utilizaba fuego para calentar la cueva o simplemente cocinar. Debido a que, la cal calcinada se hidrata muy fácilmente en presencia de agua y se endurece en el aire. La producción de cal es bastante simple, el proceso implica el calentamiento de piedra caliza hasta 850°C, una temperatura que se obtiene fácilmente quemando madera. La cal calcinada o cal viva al hidratarse únicamente necesita del CO₂ presente en la atmosfera para transformarse en carbonato de calcio y endurecer.

El mortero de cal fue utilizado en Egipto solo en la época de la ocupación romana, sin embargo, su uso se dio con anterioridad en Creta, Chipre, Grecia y el Medio Oriente (6000-12,000 A.C.) (Gourdin, 1975). El mortero se preparaba utilizando piedra caliza calcinada con arena. Los griegos usaban una proporción de arena a cal de 1:7, mientras que los romanos usaban en su mezcla una proporción de 2:1 o incluso 3:1. Los romanos perfeccionaron el arte de la preparación de morteros de cal, observando el beneficio del mezclado y del apisonamiento del material. Sin embargo, uno de los principales inconvenientes de la cal como cementante, es que en servicio pierde parte de su resistencia cuando entra en contacto con el agua, debido a su disolución parcial. Este inconveniente, ha limitado el uso de la cal en la construcción, y ha puesto atención esencialmente en las condiciones ambientales de exposición del material.

El yeso desde el punto de vista de procesamiento, es el material de construcción más simple. Las propiedades cementantes del yeso se descubrieron hace 10,000 a 20,000 años (Stark, 1999). Sin embargo, la fecha precisa del descubrimiento es difícil de establecer, debido a la falta de durabilidad del yeso en un ambiente húmedo. La producción del yeso es bastante simple, los depósitos de yeso se encuentran en muchos lugares en la superficie terrestre debido a que son el resultado de la evaporación de lagos o mares. La deshidratación del yeso requiere un calentamiento a bajas temperaturas, entre 120 y 160° C, y su rehidratación ocurre en cuestión de minutos a temperatura ambiente. El endurecimiento del mortero de yeso, se debe a la recombinación del yeso

calcinado con el agua de cristalización que había sido expulsada durante el proceso de calcinación, esto ocasiona la rehidratación del yeso, lo que forma una microestructura de agujas entrelazadas, que le dan resistencia a las pastas o morteros producidos con este material.

Muchos estudios arqueológicos han demostrado que los egipcios usaban yeso como cementante en morteros. Los egipcios utilizaron los morteros de yeso en la construcción de la pirámide de Keops (3000 A.C.; Regourd, 1988). El mortero se preparaba utilizando yeso impuro calcinado y arena, el cual al mezclarse con una pequeña cantidad de agua endurecía. Actualmente, el yeso es principalmente utilizado como material decorativo debido a que tiene una debilidad como material de construcción ya que pierde casi toda su resistencia en condiciones de humedad por ser altamente higroscópico en ambientes muy húmedos lo que lo disuelve de manera rápida.

1.1.2 Cementos hidráulicos. La cal hidráulica se obtiene a partir de la calcinación de la piedra caliza que contenía impurezas arcillosas. Además, las civilizaciones antiguas observaron que al añadir estas calizas finamente molidas a una mezcla de cal hidráulica y arena, producían morteros que no solo eran más resistentes que los morteros de cal, sino que también eran resistentes al agua. Por su lado, los griegos utilizaron una ceniza volcánica de la isla de Santorini (Metha, 1981). Así mismo los fenicios utilizaron los desechos de la arcilla cocida (Papadakis, 1970) y los Romanos en cambio utilizaron una ceniza volcánica encontrada alrededor de la bahía de Nápoles, a la que generalmente se llamaba puzolana por su cercanía al pueblo Pozzuoli (Vitruvius, 2017). Es el nombre moderno de esta ciudad el que se ha adoptado para darle el nombre de puzolana a los materiales que en presencia de humedad e hidróxido de calcio contribuyen a incrementar la resistencia y el nivel de densificación del compuesto, lo que conduce a una mayor durabilidad. Una puzolana es un material natural que reacciona con la cal hidratada a temperatura ambiente para formar silicato de calcio hidratado insoluble, con estructura química similar a los que resultan por la hidratación del cemento Portland. Los romanos entendieron muy bien el potencial económico y militar de la cal hidráulica y lo utilizaron en todo su imperio, permitiendo construir carreteras, puentes y revestir acueductos. Los romanos utilizaron estos

morteros hidráulicos para hacer una forma de concreto. Un ejemplo es el Panteón de Agripa, el cual fue construido principalmente con concreto de cal hidráulica en el siglo II, y actualmente es la estructura mejor conservada del mundo antiguo (Mark, 1986).

En general, el conocimiento de la tecnología para la producción y utilización de los materiales cementantes disminuyó a lo largo de la Edad Media, lo cual se debió a que se perdió el arte de quemar cal y la adición puzolanica. No fue sino hasta el siglo XVIII que se comenzó a trabajar para tratar de comprender la naturaleza de estos materiales cementantes. En 1756, John Smeathon, tras recibir el encargo de reconstruir el faro de Eddystone, ubicado en la costa Cornualles en Inglaterra, reconoció que los morteros de cal no resistirían la acción del agua (Bogue, 1952). Smeathon llevó a cabo una extensa serie de experimentos con diferentes calizas y puzolanas, y encontró que las mejores calizas para su uso en morteros eran las que contenían una alta proporción de material arcilloso. Finalmente, Smeathon utilizó un mortero preparado a partir de una cal hidráulica mezclada con puzolana importada de Italia. El faro de Eddystone, así reconstruido, se mantuvo durante 126 años antes de ser reemplazado por una estructura más moderna.

1.1.3 Desarrollo del cemento Portland. Después del trabajo de investigación de Smeathon, siguieron otros descubrimientos que sucedieron con bastante rapidez (Aitcin, 2008). En 1796, James Parker obtuvo una patente en Inglaterra sobre un cemento hidráulico natural, que fue producido a partir de la calcinación de la piedra caliza impura que contenía arcilla. En 1813, Vicat preparó en Francia cal hidráulica artificial calcinando mezclas sintéticas de calizas y arcillas. Asimismo, James Frost introdujo el mismo enfoque en Inglaterra en 1822 y finalmente, Joseph Aspdin en 1824 obtuvo una patente de cemento Portland. El nombre Portland fue acuñado por Aspdin debido a la similitud en la coloración del cemento endurecido con el de la piedra caliza de origen natural extraída en la isla de Portland, Inglaterra. El cemento producido por Aspdin se preparó mezclando un poco de piedra caliza y arcilla finamente molidas, las cuales fueron llevadas a un horno hasta eliminar el CO₂. Posteriormente, esta mezcla se molió finamente y se usó como cemento. Alrededor del año 1900, el quí-

mico francés Giron tuvo la idea de agregar yeso durante la molienda del clinker para controlar el fraguado y el endurecimiento del cemento Portland (Candlot, 1906). Esta es la última gran innovación química en el proceso de fabricación del cemento Portland. Actualmente, la fabricación de cemento Portland sigue siendo un proceso simple, que resulta al proporcionar una mezcla de cal, sílice, alúmina y óxido de hierro, para posteriormente someterla a una temperatura de aproximadamente 1450 °C, con el fin de transformar estos cuatro óxidos principales en las cuatro fases reactivas que en esencia constituyen al cemento Portland. La invención del cemento Portland permitió fabricar un cementante artificial capaz de endurecerse bajo el agua, con el que es posible producir una roca artificial endurecida con cualquier forma deseada.

2. Materiales del concreto

El concreto hidráulico se ha definido como un material bifásico, que consiste esencialmente de una matriz cementante, que aglutina una mezcla de agregados pétreos a los que también se les refiere como el esqueleto granular del concreto. El esqueleto granular se puede obtener a partir de diferentes tipos de materiales, utilizándose ya sea arenas y rocas naturales o materiales producto de la trituración. Como aglutinante normalmente se utiliza el cemento portland y en algunas ocasiones materiales cementantes suplementarios con actividad puzolánica.

Actualmente, el concreto base cemento Portland es utilizado en aproximadamente el 95% de las aplicaciones de la industria de la construcción (Epa, 2022) y normalmente está conformado por cemento Portland, agua, aditivos y un esqueleto granular compuesto por arena (agregado fino) y grava (agregado grueso). Con los avances recientes en la tecnología del concreto, la optimización del desempeño del concreto se ha dado gracias al surgimiento de los aditivos súper-fluidificantes o súper-reductores de agua, que permiten producir concretos con matrices más densas y con una consistencia apropiada para la colocación adecuada del concreto.

2.1 Aditivos

En los últimos años, los aditivos químicos se han convertido en un componente fundamental en la

producción del concreto hidráulico (Aci committee 212, 2016). En la actualidad, el mercado de los aditivos químicos representa 15.4 billones de dólares anuales, y para 2027 se proyecta un crecimiento del 4.8% (Grand View Research, 2020). La actual demanda de los aditivos químicos, ha sido originada por la necesidad de producir concretos con propiedades superiores, que permitan su uso en múltiples aplicaciones de la industria de la construcción. En la industria del concreto, la implementación de los aditivos químicos ha beneficiado numerosas áreas, como (ACI Committee 130, 2018): (i) en la producción del concreto, al disminuir el contenido de agua y cemento; (ii) en la construcción, al reducir el consumo de energía durante los procesos de colocación, compactación, acabado, y curado del concreto; (iii) en la vida de servicio de las estructuras, al incrementar la durabilidad del concreto. Desde la antigüedad, los aditivos han sido utilizados con la finalidad de mejorar el comportamiento de los materiales de construcción. Cientos de años A.C., algunos romanos reportaron el uso de aditivos a partir de sangre de animal, leche, y huevos como aditivos incorporadores de aire, reductor de agua, y plastificante en la producción de morteros de cal-puzolanas (Aitcin, 2018, Vazquez, 2016). Por otro lado, se establece la posibilidad de que los aztecas utilizaron el mucílago de nopal, principalmente para mejorar la plasticidad, y disminuir la porosidad en morteros de yeso con cal (Cárdenas, 1998). Otras civilizaciones antiguas, también utilizaron aditivos de base animal como la orina, los huevos, y la manteca de cerdo, y aditivos de base vegetal como la madera, paja, y corteza (Cárdenas, 2015). Sin embargo, fue hasta el siglo XX con el comienzo de la era de los aditivos, que estos materiales se utilizaron en gran escala, entre los que se puede mencionar el lignosulfonato (1920s), el lignito (1940s), la goma xantana (1960s), los éteres de celulosa (1970s), y el ácido poliaspártico (1990s) (Plank, 2004, Gelardi, 2016). Actualmente, hay países donde casi todos los concretos contienen al menos uno o varios aditivos. A continuación, haremos una revisión de los principales aditivos utilizados en el concreto y las principales ventajas que han representado para el desarrollo de la tecnología del concreto.

2.1.1 Aditivos reductores de agua. Un aditivo reductor de agua es un material que se utiliza con el fin de reducir la cantidad de agua de mezcla necesaria

para producir concreto de una consistencia determinada, ya que el reducir la cantidad de agua en un concreto, sin que se modifique la consistencia conducirá a densificar la matriz cementante y por tanto a incrementar tanto la resistencia, como la durabilidad (Gelardi, 2016). Las formulaciones de los materiales generalmente disponibles para su uso como aditivos reductores pueden incluir: (i) ácidos lignosulfónicos, sus sales y modificaciones; (ii) ácidos carboxílicos hidroxilados sus sales y modificaciones; (iii) compuestos a base de carbohidratos como azúcares, ácidos de azúcar y polisacáridos, (iv) sales de productos de policondensación de melamina sulfonada, (v) sales de productos de policondensación de naftaleno sulfonado, (vi) policarboxilatos, (vii) otros materiales. Los aditivos reductores de agua permiten reducir la relación agua/cemento, lo que favorece al incremento de resistencia y durabilidad.

2.1.2 Aditivos acelerantes. Un aditivo acelerante provoca un aumento en la tasa de hidratación del cemento hidráulico y, por lo tanto, acorta el tiempo de fraguado, aumenta la tasa de desarrollo de la resistencia del concreto, o ambos (Cheung, 2011). Los aditivos acelerantes se dividen en cuatro grupos: (i) los que contienen sales inorgánicas solubles, (ii) los que contienen compuestos orgánicos solubles, (iii) aditivos de fraguado rápido, (iv) diversos aditivos sólidos. Los aditivos acelerantes son esenciales en climas fríos, para acelerar el inicio de las operaciones de acabado, reducir el tiempo de acabado y reducir el tiempo requerido para un curado y protección adecuados. Por otra parte, los aditivos acelerantes permiten aumentar el nivel de resistencia inicial para permitir la remoción del cimbrado más temprano y disminuir el tiempo total de construcción.

2.1.3 Aditivos retardantes. Un aditivo retardante se utiliza con el propósito de retrasar el tiempo de fraguado del concreto (Marchon, 2016). Los materiales generalmente disponibles como aditivos retardantes caen en una de las cuatro categorías. Las formulaciones pueden incluir: (i) ácidos lignosulfónicos y sus sales y modificaciones y derivados de estos, (ii) ácidos carboxílicos hidroxilados y sus sales y modificaciones y derivados de estos, (iii) compuestos a base de carbohidratos como azúcares, ácidos de azúcar y polisacáridos, (iv) sales inorgánicas como boratos y fosfatos. Los aditivos retardadores, se utilizan principalmente para compensar el efecto acelerador de la

temperatura ambiente alta. Además, los retardantes permiten mantener el concreto trabajable durante el tiempo suficiente para que no se desarrollen juntas frías en los elementos estructurales de la construcción.

2.1.4 Aditivos modificadores de la viscosidad. Los aditivos modificadores de la viscosidad (VMA) suelen ser polímeros solubles en agua que se utilizan en el concreto para modificar sus propiedades reológicas (Khayat, 1998). Los materiales comúnmente utilizados como aditivos modificadores de la viscosidad son óxidos de polietileno, éteres de celulosa (hidroxietilcelulosa e hidroxipropilmetilcelulosa), alginatos (de algas marinas), gomas naturales y sintéticas, y poli-acrilamidas o alcohol polivinílico. El uso de los VMA puede hacer las mezclas más cohesivas y de esta manera evitar que las altas presiones en concretos bombeados puedan separar al mortero en la mezcla de concreto.

2.2. Aditivos minerales

Los aditivos minerales son materiales utilizados como remplazo/adición del cemento en una mezcla de concreto para mejorar sus propiedades (Liew, 2017, Khatib, 2016, Kim, 2016). Los aditivos minerales incluyen materiales que se dividen en cuatro tipos: (i) cementantes, (ii) puzolánicos, (iii) cementantes y puzolánicos, (iv) inertes químicamente. Algunos aditivos minerales típicos utilizados en el concreto son la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno y el humo de sílice. Cada uno de estos aditivos minerales afecta las propiedades del concreto: (i) Las cenizas volantes son un subproducto de las plantas de energía que queman carbón. Las cenizas volantes se utilizan típicamente en una tasa de remplazo de 20 a 40% del cemento Portland ordinario. Las cenizas volantes pueden reducir la tasa de pérdida de revenimiento del concreto en condiciones de clima cálido. (ii) La escoria granulada de alto horno es un subproducto de la industria siderúrgica. La escoria se usa en una tasa de remplazo del 30 al 70% del cemento Portland ordinario. Si el concreto hecho con escoria se mezcla y se cura de manera apropiada, presentará características de desempeño mejoradas con respecto a la resistencia y la estructura de los poros, mejorando la durabilidad del material. (iii) El humo de sílice es un subproducto de la producción de silicio metálico o aleaciones de ferrosilicio, el cual se

usa típicamente a una tasa de reemplazo del 3 al 10% del cemento Portland ordinario. Es material se puede utilizar para aumentar la resistencia del concreto y reducir de manera significativa la permeabilidad del concreto.

3. Caracterización microestructural

La caracterización microestructural hoy en día está siendo utilizada para analizar los materiales desde el punto de vista químico como desde el estudio de la interacción que se está generando entre los materiales a niveles microscópicos. Entre ellas podemos mencionar la difracción de rayos X, la microscopía electrónica de barrido, la termogravimetría y la nanoindentación como unas de las técnicas más utilizadas en la industria para profundizar el estudio del concreto a nivel microscópico.

4. propiedades del concreto

4.1 En estado fresco.

El concreto en estado fresco se presenta de forma plástica como un compuesto fácilmente moldeable capaz de ser conformado en cualquier volumen para luego endurecer y de esta manera producir un elemento capaz de resistir cargas manera confiable durante su vida de servicio. En estado fresco puede evaluarse mediante diferentes pruebas como la prueba de revenimiento, la cual da una idea de la medida de consistencia y es un indicador cualitativo de su trabajabilidad, así como de la energía/esfuerzo que requerirá el concreto para su manejo, colocación y compactación. El ensayo está basado en normas estándar en para el caso de México la normalización está referida a la NMX C-156, la prueba consiste en utilizar un cono metálico truncado de 10 cm de diámetro en su parte superior y de 20 cm en su base el cual se llena con el material con el objeto de que una vez el cono sea retirado se pueda medir una distancia entre una referencia ubicada a 30 cm de la base del cono y el centro desplazado del concreto. Otros ensayos como el de la temperatura, resultan muy importantes en aplicaciones en donde se tiene climas extremos menores de 5 °C en los cuales se puede retrasar los tiempos de fraguado del concreto y en temperaturas por arriba de 70 °C en donde el tiempo

de fraguado se puede acelerar, afectando el comportamiento de los concretos ya endurecidos si no se controla adecuadamente este parámetro.

Por otro lado, la determinación de la masa unitaria es indispensable para controlar la calidad en la producción del concreto, para verificar el volumen entregado, para controlar el peso volumétrico en concretos densos o ligeros y en controles de cantidades en la proporción del material. Hoy en día, la determinación del contenido de aire y los tiempos de fraguado se vuelven de suma importancia porque los concretos modernos, en su mayoría tienden a incorporar diversos aditivos químicos y minerales (cementantes suplementarios o puzolanas) que suelen incluir aire en el concreto y modificar en ocasiones de manera importante los tiempos de fraguado.

4.2 En estado endurecido.

Adicionalmente al desempeño del concreto en estado fresco, su desempeño en estado endurecido también es de suma importancia. En esta etapa de la vida del concreto, la propiedad que lo distingue es su resistencia a la compresión, la cual se obtiene al someter una probeta cilíndrica o cubica a un ensayo de compresión uniaxial, este tipo de ensayos se vuelve importante porque es uno de los parámetros claves para el diseño estructural de las edificaciones. Otros ensayos no menos importantes que también se requieren en algunos procedimientos del diseño estructural son el módulo de elasticidad, la relación de poisson y la resistencia a la flexión.

Como todos los materiales que se utilizan en la industria de la construcción, el concreto hidráulico y el acero de refuerzo que normalmente se utiliza en los elementos de concreto reforzado, también son susceptibles al ataque de agentes exógenos como los cloruros, la carbonatación, el sulfato, el ácido, la reactividad álcali-agregado, entre otros, los cuales pueden afectar el desempeño del material a través del tiempo. De acuerdo al ambiente en el que el concreto estará expuesto, la optimización de la proporción y las protecciones que deban implementarse podrán definirse midiendo el grado de afectación mediante evaluaciones como la prueba de carbonatación por fenoltaleina, la resistividad eléctrica, la penetración rápida de cloruros o ensayos de expansión por sulfato.

5. Nuevos concretos y las tendencias hacia el futuro

Hoy en día, a nivel global, la industria de la construcción trabaja en diferentes proyectos orientados a disminuir la huella de carbón, mediante la optimización de los procesos constructivos y la optimización del desempeño durante la vida útil de la infraestructura, incluyendo la demolición y el reciclaje. Para cumplir con este gran reto, la comunidad científica está desarrollando nuevos materiales de construcción que mejoran el comportamiento del concreto tradicional, otorgándole posibilidades de autoreparación, autolimpieza, autodetectabilidad de deficiencias, autocompactación, ultra alto desempeño en resistencia, durabilidad maximizada y posibilidades de imprimirse utilizando manufactura aditiva para proveer a la industria con concretos que contribuyen cada vez más con la tendencia mundial hacia la sostenibilidad integral de las actividades antropogénicas en armonía con un desarrollo sano de la vida en el planeta tierra. En este sentido, a continuación, haremos referencia a diferentes tecnologías que se han desarrollado para contribuir con este objetivo.

5.1. Concretos autoreparables

Con relación a la durabilidad de la edificaciones, hoy en día muchos reglamentos o códigos establecen periodos mínimos de 50 años para la vida útil de la estructuras, sin embargo un incidente común es que cuando los elementos estructurales resultan agrietados por causas diversas, la vida útil o de servicio se ve reducida por el ingreso de agentes exógenos que pueden propiciar el inicio de la corrosión del acero

de refuerzo y si no se genera el debido mantenimiento con ello conducir a una falla del elemento estructural, en ese sentido nuevos materiales como el concreto auto-reparable tiene como principal función el de auto-reparar fisuras con aberturas de alrededor de 0.9 mm (Wang, 2014), en este caso el mecanismo de auto-reparación involucra la hidratación continua de la matriz cementante o también la carbonatación mediante la cual los cristales de carbonato de calcio precipitan sobre la superficies de las fisuras como resultado de las reacciones químicas entre los iones calcio (Ca^{2+}) y el dióxido de carbono (CO_2) que se encuentra disponible en el agua alojada en el interior de la fisura (Roig, 2021, Magdalena, 2019). Ver figura 1.

La autoreparación por medio de agentes biológicos, tales como algunos tipos de bacterias que generan una precipitación de la calcita que involucra reacciones metabólicas con la fotosíntesis, como son la reducción de sulfatos, la hidrólisis de urea o la desnitrificación (Roig, 2021), las cuales permiten la autoreparación de fisuras tal y como se observa en la figura 1 y 2. Entre las bacterias que pueden generar el mecanismo antes mencionado están las *Sporosarcina pasteurii*, *Sporosarcina ureae*, y la *Bacillus sphaericus* entre otras, las cuales funciona mediante un proceso de hidrólisis de urea, o las que funciona mediante un proceso respiratorio como la *Bacillus subtilis* y la *Bacillus thuringiensis* entre otras (Roig, 2021).

5.2 Concretos autolimpiantes.

El continuo crecimiento de la población y de la actividad industrial ha provocado que los centros urbanos se vean afectados por el incremento gradual y

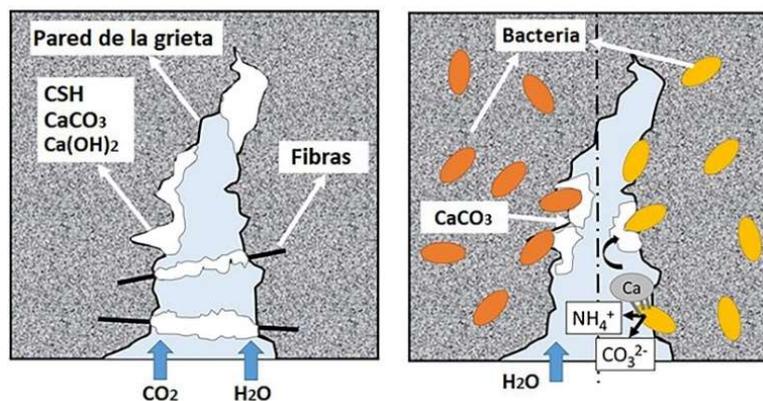


Figura 1. Autoreparación autóloga y autónoma. (Magdalena, 2019).



Figura 2. Autoreparación autónoma con bacterias. (Wang, 2014).

acelerado de la contaminación ambiental, problema que desde la Tecnología del Concreto se ha venido solucionando a través de los concretos autolimpiantes, los cuales por medio del principio de la fotocatalisis adquieren la posibilidad de autolimpiarse. Para este fin se utilizan partículas de TiO_2 que reaccionan con los rayos UV generando la descomposición de algunos materiales orgánicos de manera lenta y natural. En esta tecnología se utiliza la reacción del TiO_2 con la luz ultravioleta, debido a que este componente actúa como un catalizador que acelera la reacción química que finalmente permite limpiar el material y además ayuda con la reducción de contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x), los aromáticos, el amoníaco y los aldehídos. En el caso de los NO_x , estos son absorbidos en la superficie del concreto y transformados en iones no nocivos que permanecen bloqueados en forma de nitratos que posteriormente son eliminados de la superficie mediante la lluvia o por lavado, tal y como se puede observar en la figura 3 (Guerrini, 2018).

Este tipo de material fabricado con TiO_2 tiene como ventaja principal el ofrecer índices de reflectancia solar (SRI) más altos con tiempos más largos de servicio en comparación a los que ofrece el cemento Portland y el cemento blanco con SRI de 35 y 86 respectivamente. Lo que conduce al uso de materiales en la construcción que contribuyen a que las

edificaciones se mantengan frescas ante la luz solar, mejorando con ello la eficiencia energética en las construcciones, debido a que entre mayor sea el SRI en una superficie, menor será la energía térmica que dicha superficie transmita, mejorando de esta forma la mitigación de las islas de calor urbano.

5.3 Manufactura digital aditiva de impresión 3D en concreto.

En la mejora continua que impera en la industria de la construcción con relación al desempeño de los elementos estructurales, de manera permanente se trabaja en varias direcciones que persiguen su optimización microestructural, la mejora de sus propiedades mecánicas, elásticas y el satisfacer concepciones arquitectónicas cada vez más exigentes respecto a las propiedades ingenieriles del material, lo que implica que se eleven los costos de los encofrados cuando se requiere fabricar formas altamente complejas. Una alternativa para dar solución a este tipo de requerimientos aparece con el uso de modernas metodologías constructivas como la impresión 3D, la cual toma el mismo concepto que se aplica en la impresión convencional de polímeros a pequeña escala y la transforma en una forma constructiva no convencional de avanzada en el sector de la construcción. Llamada naturalmente manufactura digital en concreto (DFC), la industria con esta técnica tiene la

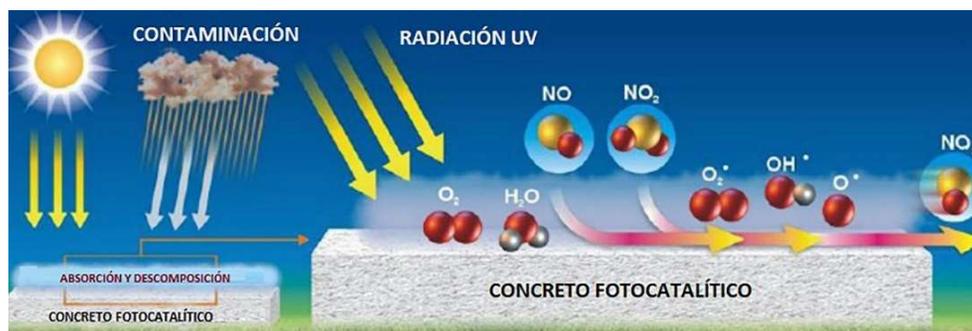


Figura 3. Proceso de fotocatalisis en el concreto. (Dženana, 2016).



Figura 4. Formas de DFC mediante CC. (Sculpteo, 2022).

posibilidad de trabajar cualquier forma compleja sin ningún problema, lo que conduce a optimizar los procesos constructivos, desde la etapa de diseño hasta el momento en donde la estructura se habilita para ser utilizada (Behrokh, 2004).

Una de las primeras técnicas utilizadas para realizar DFC es el Countour Crafting (CC) (Buswell, 2018), la cual busca una fabricación automatizada de estructuras completas y de sus subcomponentes, permitiendo construir una sola unidad habitacional o colonias de casas en una sola corrida, con distintos posibles diseños y formas complejas, según las necesidades arquitectónicas. Esta tecnología constructiva se aplica adicionando mediante fabricación aditiva capas de material cementante para crear superficies planas, suaves y precisas (Behrokh, 2004). (Ver figura 4).

Otra manera de imprimir digitalmente el concreto en 3D es la tecnología D-Shape, la cual trabaja depositando una primera capa de material granular mediante un pórtico, el cual deposita de igual forma el aglutinante en las áreas definidas por el diseñador

del proyecto a construir, la suma repetitiva de los pasos anteriores produce verticalmente la edificación diseñada previamente, unas veces que se termina el proceso anterior se comienza con la remoción del material granular mediante el uso de aspiradoras de alta potencia hasta que las formas arquitectónicas se hacen visibles. (Shape, 2022, Ming, 2016), Ver figura 5.

Este tipo de técnicas constructivas tienen como principales ventajas una mayor velocidad de construcción, menores costos en mano de obra y en cimbras, una mayor seguridad industrial para los trabajadores, así como también la consecución de procesos constructivos más sostenibles con base a diseños estructurales más eficientes, debido a que mediante esta tecnología es posible colocar el material en lugares específicos para la construcción de elementos con morfologías especiales, que permitan una distribución óptima de las capacidades estructurales y una mayor contribución a favor de la sostenibilidad. De igual manera también se reduce la generación de desechos de materiales en la obra permitiendo opti-



Figura 5. Proceso de impresión D-Shape. (Hamad, 2020).

mizar costos (Wangle, 2016). Por otro lado, esta tecnología también se presentan desventajas ya que por ser robotizada reducirá la necesidad de la mano de obra, lo que en el corto plazo puede detonar una problemática social al incrementar las tasas de desempleo; otra desventaja está relacionada con la calidad de los acabados en el producto final obtenido por la alta rugosidad que se genera durante el proceso de impresión, también se puede catalogar como desventaja el bajo alcance en la escala de las edificaciones tanto desde el punto de vista constructivo, como desde lo estructural. Por ahora una de las más importantes desventajas es el alto costo inicial de los equipos para realizar la impresión 3D, ya que en la actualidad puede ser prohibitivo para muchas regiones del mundo (El-Sayegh, 2020).

Desde el punto de vista de los materiales que se utilizan para construir mediante impresión 3D, es posible usar los componentes que se usan en la producción del concreto convencional (Rael, 2020), así como también los que se utilizan para fabricar sistemas conocidos como cementantes activados alcalinamente, entre los cuales se pueden mencionar combinaciones de escoria de alto horno, arena y silicato de sodio, entre otras (Ming, 2016).

En cuanto a su caracterización estado fresco este tipo de material se puede relacionar con el periodo de tiempo durante el cual el concreto puede ser usado (tiempo abierto) y su efecto en la bombeabilidad y en la extrusión, así como con el fraguado y el tiempo de ciclo por capa, el cual se relaciona con el tiempo requerido para completar una capa de fabricación [36]. Desde su estado endurecido es importante que el concreto impreso por 3D, tenga una buena adherencia entre las capas, por controles de durabilidad una adecuada densidad aparente, control en la retracción para mitigar la fisuración del elemento fabricado por exposición directa con el ambiente. La evaluación de la calidad del concreto ya colocado en la estructura aun representa un gran reto para el aseguramiento de la calidad y la optimización de la tecnología.

5.4 Concretos autocompactables

La continua necesidad de buscar materiales que mejoren los procesos constructivos en la industria de la construcción ha generado una evolución sustancial del concreto como material de construcción,

es de ahí que las nuevas tecnologías en aditivos y el estudio a profundidad de subproductos de industriales que pueden integrarse al concreto para mejorar sus propiedades, ha conducido a la producción de concretos con ciertas características mejoradas, respecto a los concretos convencionales, propiedades como alta resistencia, excelente desempeño ante la durabilidad, mejores facilidades en la colocación, mejor capacidad de relleno, baja segregación y excelentes acabados, son características de los concretos autocompactables, los cuales según su inventor, el profesor Okamura de la Universidad de Tokio, se define como concretos que sin presentar segregación o exudación, son capaces de fluir en el interior del cimbrado, relleno de forma natural el volumen del mismo, y pasar entre las barras de la armadura, sin otro medio de compactación durante su puesta en obra, consolidándose por su propio peso, de ahí que este concreto especial se ha convertido en el más utilizado a nivel mundial en grandes obras de infraestructura por su gran versatilidad en la colocación y sus excelentes acabados, entre muchos otros beneficios (Okamura, 2013). Ver figura 6.

Entre las principales ventajas de este tipo de concreto respecto al convencional se puede mencionar que se reduce el tiempo de colado por lo que se utiliza menor cantidad de equipos y menos mano de obra, también se mejoran los comportamientos mecánicos y la durabilidad del material, presenta una alta estética, con excelente acabado superficial, libre de defectos y manchas, mejora de la sostenibilidad, principalmente debido al uso efectivo de los subproductos y mejora sustancialmente el comportamiento reológico del material. Como desventajas podemos citar que se requiere un mayor control de calidad de los materiales, así como el alto costo en su producción (Researchgate, 2022).

5.5 Concretos de Ultra Alto desempeño

Entre los concretos más utilizados hoy en día en la industria de la construcción para dar soluciones especiales cuando se requiere fabricar elementos con propiedades mecánicas y de durabilidad mejoradas que conducen a soluciones con miembros estructural con menores dimensiones y a su vez menores costos de instalación y mano de obra, se puede encontrar al Concreto de Ultra Alto Desempeño (Abbas, 2016), conocido por sus siglas en inglés como UHPC el cual



Figura 6. Colado de un concreto Autocompactable. (Medium, 2022).

se define como un material base cemento con altas resistencias a la compresión, excelente durabilidad y adecuada ductilidad, caracterizados por contener altos contenidos de cementantes, muy bajas relaciones a/mc, por el uso de microsílíce, superplastificantes y/o fibras dúctiles. En este tipo de concreto de pueden encontrar resistencias a la compresión que van desde 120 a 150 MPa, resistencias a la flexión que oscilan entre 25 a 60 MPa, módulos de elasticidad de 40 a 60 GPa y energías de fractura de alrededor de 140 kJ/m². (Caijun, 2021), los cuales tienen como principios básicos para alcanzar los desempeños antes mencionados el tener muy bajas porosidades en su matriz cementicia, empaquetamiento controlado de sus componentes, adecuada homogeneidad, una correcta sinergia microestructural y como se dijo anteriormente muy bajas relaciones agua cemento, lo que le permite generar soluciones arquitectónicas y estructurales con desempeños mucho más prolijas que los del concreto convencional, tiene como principal desventaja los costos de producción razón por la

cual es utilizado en construcciones especiales en donde se requiere dimensiones en los elementos muy esbeltas.

6. Aplicaciones de los concretos especiales

Algunos de los concretos antes mencionados ya se pueden encontrar en aplicaciones a gran escala y en otros se está comenzando con su desarrollo. A continuación, se van a describir algunas de las aplicaciones más conocidas de los concretos especiales. Primero se hablará del concreto autoreparable, para el cual se pueden enunciar las aplicaciones siguientes:

Una construcción de una losa antiflotación (ver figura 7) en Brasil de 30 cm de espesor y 250 m², a la cual se le aplicó un aditivo químico (aditivo reductor de permeabilidad) conocido para promover el sellado de grietas de hasta 0.4 mm. [49] Una de las últimas aplicaciones de los concretos autoreparables con



Figura 7. Losa antiflotación. (Silva, 2016).



Figura 8. Losa de foso de inspección. (Van Mullem, 2020).

bacterias, es la losa de foso de inspección hidráulico en Amberes Bélgica (Van Mullem, 2020). Esta aplicación se puede observar en la figura 8.

Por otro lado, desde el punto de vista del concreto autolimpiante se tiene gran cantidad de aplicaciones entre las cuales se puede mencionar como la primera aplicación a gran escala la construcción de la iglesia “Dives in Misericordia” ubicada en Roma desde 1996. En México se tiene una aplicación de este tipo de concreto en el Hospital Dr. Manuel Gea González a desde el 2013. Ver figura 9.

Respecto a las aplicaciones de manufactura digital 3D, la tecnología constructiva se ha usado en la fabricación de muros prefabricados a escala real (Mohammad, 2017, Images, 2022), prototipos de edificaciones a construirse en Marte y la Luna, puentes peatonales como el striatus en Venecia Italia, el puente peatonal de Madrid en España y el de

Shanghai en China el cual es el más largo del mundo en manufactura digital con una longitud de 26.3 m. de menor envergadura. (Archdaily, 2022) ver figura 10.

En el caso del concreto autocompactable, cuando esta apropiadamente diseñado (lo cual no es sencillo) es uno de los más utilizados a nivel mundial por su alta capacidad de relleno y habilidad de paso, así como también por su alta resistencia a la segregación, lo que lo ha convertido en el material preferido cuando se requiere colar formas complejas y en edificaciones de gran altura. En México ya existen varios proyectos que han utilizado este tipo de concretos, uno de ellos es el parque Eólico Ventikas en Nuevo León, para el cual se fabricaron torres eólicas de concreto autocompactable con flujos de revenimiento de 70 cm. La otra aplicación de este tipo de concreto en nuestro país se dio en la torre T-OP, en Monterrey

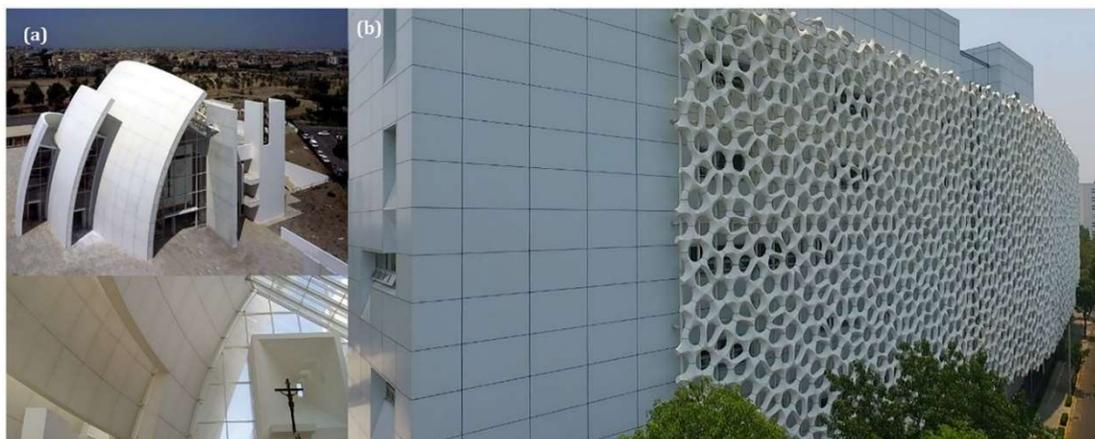


Figura 9. Aplicación de concretos autolimpiantes. a) Iglesia Dives in Misericordia, b) Hospital Dr. Manuel Gea Gonzales. (Geocities, 2022, Local, 2022).



Figura 10. (a) Puente peatonal en Madrid - España, b) Puente Peatonal en Shanghai China. (Images, 2022, Archdaily, 2022).

Nuevo León, para la cual el concreto fue suministrado por Concretos Tepeyac S.A. de C.V., y a la fecha es catalogada como la más alta de Latinoamérica con 3 05.3m de altura. Ver figuras 11 y 12.

Por último, el concreto de Ultra-Alto Desempeño ha venido utilizándose de manera importante por su alta Resistencia, utilidad y durabilidad en muchos escenarios de construcción, tanto en elementos muy esbeltos como en fachadas de importantes proyectos arquitectónicos. A continuación, se podrán observar algunas de estas aplicaciones en el estadio de Jean Bouin, en Paris, Francia y en el MuCEM en Marcella Francia. Ver figuras 13 y 14.

7. Conclusiones

En la historia de la humanidad, los diversos tipos de cementantes que se han utilizado por diferentes culturas, han tenido como principal objetivo el mejoramiento de las condiciones de vida del ser humano, de la economía mundial y de la sostenibilidad, todo

con el fin de que a través del desarrollo las técnicas analíticas, de la mecanización de procesos, del diseño y de la manufactura, se genere el mejoramiento de las propiedades de los materiales, de los procedimientos constructivos y de la satisfacción de las necesidades de bienestar de la población mundial, en ese sentido el continuo desarrollo de los materiales ha permitido la solución de distintos retos de la ingeniería actual en beneficio del ser humano, esto con el uso de los concretos convencionales modificados con materiales cementicios suplementarios, fibras y con aditivos químicos que les permiten mejoras en sus comportamientos generando desempeños avanzados en este material para requerimientos específicos produciendo soluciones para una humanidad que siempre intenta el avance en su bienestar.

Los cementantes no hidráulicos fueron la base de los ligantes de las construcciones del mundo antiguo, permitiendo desarrollar procesos constructivos de edificaciones que hoy en día se pueden apreciar



Figura 11. Parque eólico Ventikas. (Imagen proporcionada por Javier Góngora Cemex, México).



Figura 12. Torre T-OP, Monterrey. (Arquine, 2022).

como ejemplo de las maravillas construidas por el hombre.

El desarrollo de los aditivos químicos y la reutilización de subproductos industriales generó la evolución de los concretos convencionales a concretos especiales, que hoy en día ofrecen propiedades de muy alto desempeño al sector de la construcción.

El concreto especial con mayor aplicación industrial es el concreto autocompactable, esto debido a su fácil fabricación, colocación, resistencias adecuadas y durabilidad, e incluso con menores costos económicos en comparación con otros concretos como el UH PC o con el concreto autoreparable lo que lo hace el más utilizable hoy en día en grandes megaproyectos de construcción a nivel nacional y mundial.

8. Referencias

- ACI Committee 130, 2019. Report on the Role of Materials in Sustainable Concrete Construction, American Concrete Institute p 20, ISBN: 978-1-64195-048-0.
- ACI Committee 212, 2016. Report on Chemical Admixtures for Concrete, American Concrete Institute, p 29, ISBN 978-0-87031-402-5.
- Aitcin P.C., 2008, Binders for Durable and Sustainable Concrete, Ed. Taylor & F, p 18, ISBN 9780367864125.
- Behrokh Khoshnevis, 2004, Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies., Automation in Construction 13 p5–9.
- Bogue, R.H., 1952, La Chimie du ciment Portland, (Ed. Eyrolles), p 34.



Figura 13. Estadio Jean Bouin, París, Francia. (Architectmagazine, 2022).



Figura 14. MuCEM, Marcella, Francia. (Tarpin, 2022).

- Buswell, R.A., Leal de Silva, W.R., Jones, S.Z., Dirrenberger, J., 2018, 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, *Cement and Concrete Research*, 112 p 37–49.
- Candlot, E., 1906, *Ciments et chaux hydrauliques: fabrication, propriétés*, (Polytechnique Library), p 18.
- Cárdenas, R., Arguelles, M., Goycoolea, M., 1998, On the Possible Role of *Opuntia ficus-indica* Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings, *J. Prof. Assoc. Cactus Dev.*, 3, p 64–71.
- Cheung, J., Jeknavorian, A., Roberts, L., Silva, D., 2011, Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement, *Cem. Concr. Res.* 41, p1289–1309. doi:10.1016/j.cemconres.2011.03.005.
- Dženana Bečirhodžić et al, 2016, Self-cleaning concrete – a construction material for building cleaner world, 20th International Research/Expert Conference Trends in the Development of Machinery and Associated Technology, Mediterranean Sea Cruising, 24th September - 1st October.
- El-Sayegh S., 2020, A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20, p34, doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w.
- Gelardi, G., Mantellato, S., Marchon, D., Palacios, M., Eberhardt, A.B., Flatt, R.J., 2016, *Chemistry of chemical admixtures*, (Woodhead Publishing), p 149, doi:10.1016/B978-0-08-100693-1.00009-6.
- Gourdin W.H., Kingery W.D., 1975, The Beginnings of Pyrotechnology: Neolithic and Egyptian Lime Plaster, *Journal of Field Archaeology*, 2:1-2, 133-150, DOI: 10.1179/009346975791491277.
- Grand View Research, 2020, *Concrete Admixtures Market Report*, p 46, Report ID: GVR-1-68038-544-1.
- Guerrini, G. L., 2018, Photocatalytic cement – based materials: applications and new perspectives, Photopaq Symposium, Porticcio, May 17.
- Hamad Al Jassmi, Et al, 2018, Large-Scale 3D Printing: The Way Forward, *Materials Science and Engineering*, p 324, doi:10.1088/1757-899X/324/1/012088 <http://www.d-shape.com>, [consultado 27 de abril de 2022].
- <https://www.epa.gov/enforcement/cement-manufacturing-enforcement-initiative> [Consultado 6 de abril de 2022]
- <https://www.sculpteo.com/blog/2018/01/03/concrete-3d-printer-the-new-challenge-of-the-construction-business/>, [consultado 28 de abril de 2022].
- Ivanov, V., Stabnikov, V., 2015, Construction Biotechnology: a new area of biotechnological research and applications, *World J Microbiol Biotechnol*, 31:1303–1314, DOI 10.1007/s11274-015-1881-7.
- Khatib, J., *Sustainability of Construction Materials*, 2016, (Woodhead Publishing), p 371, doi.org/10.1016/B978-0-08-100370-1.00015-9.
- Khayat, K.H., 1998, Viscosity-enhancing admixtures for cement-based materials - An overview, *Cem. Concr. Compos.*, 20, p171–188. doi:10.1016/S0958-9465(98)80006-1.
- Kim, H., Koh, T., Pyo, S., 2016, Enhancing flowability and sustainability of ultra high performance concrete incorporating high replacement levels of industrial slags, *Constr. Build. Mater.* 123 p153–160. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.134.
- Kosmatka, S.H., Wilson, M., 2016, *Design and Control of Concrete Mixtures*, (Ed. Portland Cement Association), p 23. ISBN,0893120871, 9780893120870.



- Liew, K.M., Sojobi, A.O., Zhang, L.W., 2017, Green concrete: Prospects and challenges, *Constr. Build. Mater.* 156 p1063–1095. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008.
- Magdalena Rajczakowska, et al, 2019, Autogenous Self-Healing: A Better Solution for Concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering* Vol. 31, Issue 9.
- Malinowski, R., Garfinkel, Y., 1991, Prehistory of concrete, *Concrete International*, 13 62–68.
- Marchon, D., Flatt, R.J., 2016 Impact of chemical admixtures on cement hydration, (Woodhead Publishing), p 279, doi:10.1016/B978-0-08-100693-1.00009-6.
- Mark, R., Hutchinson, P., *The Roman Pantheon*, 1986, *The Art Bulletin*, 68:1, 24-34, DOI: 10.1080/00043079.1986.10788309.
- Metha, P.K., 1981, Studies on blended Portland cements containing Santorin earth, *Cement and Concrete Research*, 11, 4, 507–518., [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90080-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90080-6).
- Mindess, S., Young, J.F., Darwin, D., 2003, *Concrete*, (Ed. Pearson Education), p 9, ISBN10: 0130646326.
- Ming Xia, Jay Sanjayan, 2016, Method of formulating geopolymer for 3D printing for construction applications, *Materials and Design*, 110. p 382–390.
- Mohammad Reza Khorramshahi , Ali Mokhtari, 2017, Automatic Construction by Contour Crafting Technology, *Italian Journal of Science - Engineering*, Vol. 1, No. 1. doi:10.28991/esj-2017-01113.
- Okamura H., Ouchi M., 2013, Self Compacting Concrete, Hajime Okamura, Masahiro Ouchi, *Self-Compacting Concrete*, *Journal of Advanced Concrete Technology* Vol. 1, No. 1, p5-15.
- Papadakis, M., Venuat, M., Vandamme, J., 1970, *Industrie de la chaux, du ciment et du plâtre*, (Dunod).p 22.
- Plank, J., 2004, Applications of biopolymers and other biotechnological products in building materials, *Appl Microbiol Biotechnol*, 1–9. doi:10.1007/s00253-004-1714-3.
- Rael, R., San Fratello, V. 2011, Developing Concrete Polymer Building Components for 3D Printing, *Acadia 2011 proceedings*, p152-157.
- Regourd, M., Kerisel, J., Deletie, P., Haguenaer, B., 1988, Microstructure of mortars from three Egyptian pyramids, *Cement and Concrete Research*, 18, 1, 81–90. doi:10.1016/0008-8846(88)90124-X.
- Roig-Flores, M., et al, 2021, Self-healing concrete-What Is it Good For?, *materiales de construcción*, Vol. 71, Issue 341.
- Stark, J., Wicht, B., 1999, Zur Historie des gipses, *ZKG Int*, 10, 527–33.
- Vazquez, A., Pique, T. M., 2016, Biotech admixtures for enhancing portland cement hydration, *Biopolymers and Biotech Admixtures for Eco-Efficient Construction Materials*, p 81-98, doi:10.1016/B978-0-08-100214-8.00005-1.
- Vitruvius, *Les Dix Livres d’architecture de Vitruve translated*, (Ed. Wentworth Press), p151.
- Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W. De Belie, N., 2014, Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores. *Cem. Concr. Res.* 56, 139-152.
- Wangler T., Et al, 2016, Digital Concrete: Opportunities and Challenges, *RILEM Technical Letters* 1, 67 – 75.

Páginas web

- <http://www.d-shape.com>, [consultado 27 de abril de 2022].
- <https://www.epa.gov/enforcement/cement-manufacturing-enforcement-initiative> [Consultado 6 de abril de 2022]
- <https://www.sculpteo.com/blog/2018/01/03/concrete-3d-printer-the-new-challenge-of-the-construction-business/>, [consultado 28 de abril de 2022].
- <http://www.geocities.ws/arquique/meier/meiercy.html> [consultado el 22 mayo de 2022].
- <https://local.mx/ciudad-de-mexico/medio-ambiente/torre-de-especialidades-hospital-manuel-gea-gonzalez-contaminacion/>. [consultado el 22 mayo de 2022].
- <https://images.adsttc.com/media/images/5886/1183/e58e/>. [consultado el 22 mayo de 2022].
- https://www.archdaily.com/909534/worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china/5c3f4eb3284dd125fd000106-worlds-largest-3d-printed-concrete-pedestrian-bridge-completed-in-china-photo?next_project=no. [consultado el 22 mayo de 2022].
- <https://www.arquine.com/torre-t-op>[consultado el 22 mayo de 2022].
- https://www.architectmagazine.com/project-gallery/jean-bouin-stadium_o. [consultado el 22 mayo de 2022].
- <https://tarpin-bien.com/lieu/le-mucem/>[consultado el 22 mayo de 2022].