

El concreto no desaparece, evoluciona *Concrete doesn't disappear, it evolves*

Dr. Ing. Idalberto Águila A.

<https://orcid.org/0000-0002-6621-9852>

Correo-e: idalbertoaguila@gmail.com

Recibido: 13-06-2024 | Aceptado: 31-10-2024

Resumen

El propósito de este artículo es ofrecer una visión de la actualidad y perspectivas de utilización del concreto en la construcción. Esto a raíz de las dudas generadas, en parte de la comunidad científica, sobre la conveniencia de su utilización a futuro, cuyo origen está en el impacto ambiental que provoca su producción y uso. Con ese objetivo se parte de un análisis de algunas de las principales manifestaciones de este impacto y, como respuesta, se presentan algunos resultados de investigaciones recientes desarrolladas en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción, cuyo fin es mejorar el carácter ecológico del concreto, combinados con una recopilación de las tendencias internacionales de investigación en el tema. Si bien queda evidenciado que las tecnologías tradicionales de producción de concreto generan un impacto en el ambiente, los avances tecnológicos mostrados demuestran que se puede transformar el concreto, no solo disminuyendo su impacto ambiental, sino ocasionalmente incidiendo positivamente en el medio ambiente.

Descriptores

Impacto ambiental; concreto; nuevas tecnologías y materiales aplicados al concreto.

Abstract

The purpose of this article is to offer a vision of the current situation and perspectives of the use of concrete in construction. This is due to the doubts generated, in part of the scientific community, about the convenience of its use in the future, whose origin is in the environmental impact caused by its production and use. The starting point is an analysis of some of the main manifestations of this impact. Results of recent research developed at the Institute for Experimental Development of Construction are presented, whose purpose is to improve the ecological character of concrete, combined with a compilation of international research trends on the subject. Although it is evident that traditional concrete production technologies generate an impact on the environment, the technological advances shown demonstrate that concrete can be transformed, not only reducing its environmental impact, but occasionally having a positive impact on the environment.

Descriptors

Environmental impact; concrete; new technologies and materials applied to concrete.

La actividad de la construcción involucra el uso de una gran cantidad de materiales pero el empleo indiscriminado de materiales para la construcción de edificaciones y otras obras de infraestructura pone en riesgo, no solo la capacidad del planeta para proveer los recursos naturales necesarios, sino también las posibilidades de la industria de materiales de construcción para satisfacer la demanda de estos.

El concreto es el material que más se utiliza en la mayoría de las edificaciones. Esto gracias a sus excelentes cualidades para dar respuesta a las necesidades de las obras y a la facilidad relativa con que se elabora, lo cual lo provee de gran aceptación cultural. Sin embargo, en las últimas décadas ha comenzado a cuestionarse su utilización de forma masiva, debido al impacto ambiental que provocan tanto su elaboración como su uso. Esta situación es motivo de preocupación para muchos investigadores a nivel internacional y objeto de numerosos estudios como los que se han emprendido en el Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), perteneciente a la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la UCV.

La actual demanda de edificaciones hace que no se pueda prescindir del uso de este material. El reto está en encontrar fórmulas que permitan continuar utilizándolo, pero tratando de darle un uso más racional para disminuir sus costos y las afectaciones al ambiente. Se trata de hacer que el concreto evolucione y se transforme en un material más sostenible y económico, acorde a las necesidades actuales y futuras. El grupo de Concreto del IDEC se ha dedicado en los últimos años a ofrecer soluciones a algunos de los problemas económicos y ecológicos que presenta este material. Numerosas investigaciones a nivel mundial se adelantan con esos fines y ya se muestran logros de gran trascendencia.

Impacto ambiental de la producción y uso del concreto

El cemento es el constituyente principal del concreto, pero desde el punto de vista ambien-

tal es el que mayor impacto genera. Los efectos más notables se concentran en el consumo de materias primas naturales, el consumo energético y las emisiones. La producción mundial de cemento en el año 2013, según IndexMundi (2015), superó los 4.070 millones de toneladas. Si partimos de que para producir una tonelada de cemento se consumen aproximadamente 1,6 toneladas de materias primas naturales, esto indica que anualmente se deben extraer de la naturaleza más de 6.512 millones de toneladas de caliza y arcilla.

Según Cachán (2001), en la obtención del clinker se requiere quemar en el horno una cantidad de combustible capaz de generar una energía de 3.200 a 5.500 MJ/ton de clinker, esto es entre 80 y 110 kg de combustible (Domoterra, 2013). Esto representa un consumo anual de entre 325,6 millones y 447,7 millones de ton. de combustible a nivel mundial. Durante el proceso de molienda se consume una energía eléctrica de 90 a 130 kwh/ton de cemento (Cachán, 2001), lo cual representa un consumo mundial de entre 366.300 millones y 529.100 millones de kwh al año.

Las principales emisiones se producen durante el proceso de calcinación de las materias primas para la obtención del clinker. Los volúmenes aproximados en que se emiten, según Ministerio de Medio Ambiente (2004) son: Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y otros compuestos nitrogenados, entre 0,4 y 6 kg. por ton. de clinker; Dióxido de Azufre (SO_2) y otros compuestos sulfurosos, entre 0,02 y 7 kg. por ton. de clinker; Dióxido de Carbono (CO_2), entre 800 y 1040 kg. por ton. de clinker. Según Domoterra (2013) se estima que el 5 % de las emisiones mundiales de CO_2 se debe a la producción de cemento; Partículas, los hornos europeos emiten entre 5 y 200 mg. de polvo/ m^3 de aire (Domoterra, 2013).

Según cálculos estimados los 4.070 millones de ton. de cemento servirían para producir unos 11.629 millones de m^3 de concreto que equivalen a 27.909 millones ton. Se requerirían para esto unas 24.178 millones de ton. de agregados. Otros impactos importantes que provoca la

producción de agregados están asociados a la extracción en canteras, la trituración en planta y el transporte. En estos procesos se genera un importante consumo energético, abundantes emisiones de partículas e hidrocarburos volátiles, así como desaparición de la capa vegetal.

Se puede estimar que para producir esos 11.629 millones de m³ de concreto se requieren unos 2.326 millones de m³ de agua de constitución. A estos hay que añadir que para el curado se consumen entre 15 y 50 litros de agua por m² de superficie de concreto. Igualmente gran cantidad de agua se consume para la limpieza de las herramientas. Una cifra que se puede manejar es que para la limpieza de un camión trompo se requieren alrededor de 2,25 m³ de agua por camión por día.

En busca de un concreto más ecológico

En la actualidad, la mayor parte de los productores de cemento realizan esfuerzos por disminuir el impacto sobre el medio ambiente (Portland Cement Association, 2005). De ahí se han originado algunas buenas prácticas de la industria del cemento, entre las que se pueden destacar:

- *Sustitución de materias primas por residuos de otras producciones:* Las materias primas fundamentales que se utilizan para la producción de cemento son Caliza y Arcilla, además de pequeñas cantidades de Yeso. Algunos productores han estado sustituyendo parcialmente estas materias primas por algunos subproductos o desechos de otras industrias. Entre los más usados están: Cenizas volantes obtenidas en las centrales térmicas, Escorias de alto horno provenientes de la industria siderúrgica, Microsílice generada en la producción de metal silicio, Lodos de papeleras, Cenizas de pirita y Fosfoyesos provenientes de la desulfuración de gases o la producción de ácido fosfórico (Ministerio de Medio Ambiente, 2004). De una u otra forma, estos

materiales suelen verterse al medio ambiente depositándolos en el suelo de las cercanías a su producción o expulsándolos hacia la atmósfera.

- *Sustitución de combustible por residuos de otras producciones:* Para reducir el alto consumo de combustibles fósiles durante el proceso de clinkerización se utilizan variados materiales, mayormente residuos, con mayor o menor efectividad y aceptación. Algunos ejemplos son: Combustibles líquidos (aceites, disolventes, pinturas), Neumáticos usados, Residuos de papel, Residuos de plástico, Residuos de madera, Harinas o grasas animales, Biomasa, Lodos industriales y de depuración de aguas residuales (Ministerio de Medio Ambiente, 2004). En la utilización de estos combustibles debe cuidarse la posible presencia de sustancias indeseables que podrían afectar el proceso de fabricación o generar emisiones contaminantes.
- *Control de emisiones de partículas:* El polvo emitido durante la molienda y la combustión es dañino para la salud. La presencia de sílice libre puede causar silicosis en los trabajadores. Capturar este polvo no solo evita la contaminación sino que puede reutilizarse devolviéndolo al proceso con el consiguiente ahorro de materias primas naturales. Se distinguen dos tipos: Filtros de acción mecánica como los Ciclones, Filtros de manga, etc. y Precipitadores electrostáticos.
- *Otras alternativas en desarrollo:* Mejorar la eficiencia energética de los molinos y ventiladores: Se estima que por esta vía se pueda reducir el consumo energético en un 5 % para 2030 y entre un 10 y un 15 % para 2050 (Ministerio de Medio Ambiente, 2004).
- *Captura y almacenamiento de CO₂:* Se trata de separar el CO₂ de otros gases emitidos, transportarlo a un lugar de almacenamiento y aislarlo a largo plazo de la atmósfera.

Aportes del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC)

Mortero reforzado con mallas de plástico

En el IDEC, luego de varias experiencias utilizando Mortero Armado (Ferrocemento) en la elaboración de componentes constructivos, se propuso la elaboración de paneles de pared donde se sustituyeron las mallas de acero, características del ferrocemento, por mallas de plástico (imagen 1). Las mallas de plástico permiten no consumir acero que es un material más costoso y con un impacto ambiental apreciable durante su elaboración, además de que es susceptible de corroerse afectando la durabilidad de las edificaciones (Mejías, 2010).

Concreto reforzado con fibras vegetales

Otra vía para ahorrar acero de refuerzo es la utilización de fibras vegetales como sustituto. Estas fibras le aportan la ductilidad necesaria de los componentes de concreto, la cual no la tendrían si se utilizara concreto simple. La imagen 2 muestra el ensayo de resistencia a la flexión de un panel elaborado con refuerzo de fibras de sisal (Centeno, 2010).

Las curvas de carga *versus* deflexión del ensayo muestran el fallo dúctil de las muestras reforzadas con fibras frente al fallo frágil o brusco de las muestras de concreto simple (imagen 3).

Imagen 1. Panel de mortero armado con mallas de plástico



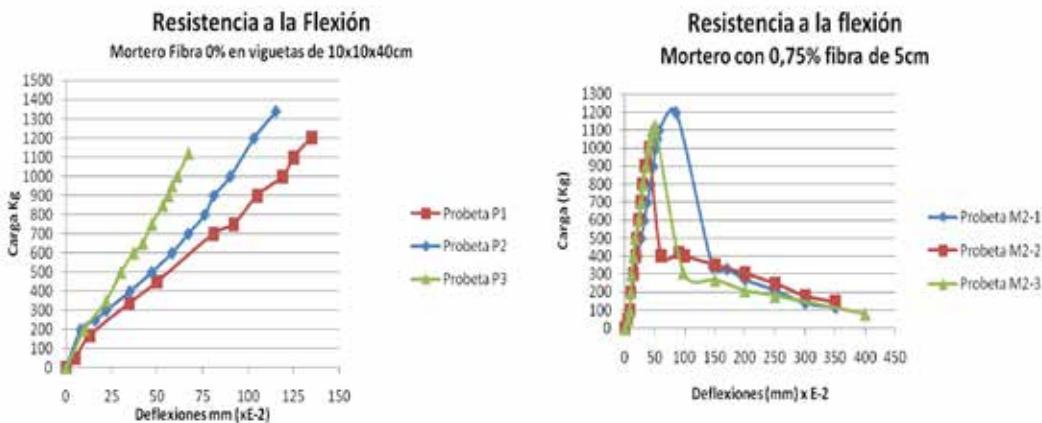
Fuente: Mejías, 2010.

Imagen 2. Ensayo a flexión de panel reforzado con fibras vegetales



Fuente: Centeno, 2010.

Imagen 3: Curvas de carga *versus* deflexión



Fuente: Centeno, 2010

Concreto aligerado

El concreto aligerado con burbujas de aire introducidas en la mezcla de concreto a partir de aditivos químicos, se emplea desde mediados del siglo XX. En el IDEC se ha desarrollado una tecnología para producir paneles de cerramiento con concreto aligerado (imagen 4), logrando por esta vía reducir el peso de las paredes con la consiguiente reducción de las secciones de los elementos estructurales (Acevedo, 2010).

Imagen 4. Paneles de concreto aligerado



Fuente: Acevedo, 2010.

Agregados de residuos pétreos provenientes de demolición

El concreto no es un material que brinde muchas facilidades para el reciclaje. Una manera muy estudiada es la utilización de residuos de demolición como agregados para producir concreto nuevo. En la experiencia del IDEC se sometieron a procesos de trituración restos de concreto recuperados de un vertedero informal ubicado en la carretera Guanta-Cumaná (imagen 5).

Tanto desde el punto de vista físico como químico, los agregados obtenidos (imagen 6) poseen potencialidades para su utilización, dentro de ciertos límites, como sustitutos parciales o totales de agregados naturales (Báez, 2016). Sin embargo, se requiere continuar la investigación para establecer con claridad sus condiciones de uso.

Cementos puzolánicos a partir de residuos agrícolas

Las adiciones puzolánicas constituyen un recurso muy valioso para disminuir el consumo de cemento dentro de las mezclas de concreto. El cemento puede ser sustituido parcialmente por materiales puzolánicos, los cuales –entre otras fuentes– pueden ser desechos de diferentes procesos industriales y agrícolas. En el IDEC han sido evaluados varios residuos agrícolas con este fin, lográndose excelentes resultados con la ceniza de cascarilla de arroz (imagen 7) y descubriendo la hoja de maíz como posible fuente de material puzolánico (Águila, 2012).

Imagen 5. Vertedero informal de residuos de demolición



Fuente: Báez, 2016.

Imagen 6. Agregados triturados



Fuente: Báez, 2016.

Concreto de alta resistencia

La combinación de aditivos superplastificantes combinados con adiciones puzolánicas ha provocando un cambio radical en la tecnología del concreto. A nivel de laboratorio en el IDEC, incorporando a la mezcla policarboxilato (superplastificante) y microsilice (puzolana), se han logrado, en probetas cúbicas de mortero, valores de resistencia a compresión muy cercanos a 800 Kgf/cm² (Mejías y Águila, 2018). Con estos valores de resistencia se pueden diseñar elementos estructurales con secciones racionalizadas con el consiguiente ahorro de materiales y la disminución del peso de la estructura.

Concreto descontaminante y autolimpiante

Las innovaciones en la tecnología del concreto han permitido asignarle funciones alejadas de su naturaleza. Es el caso donde la incorporación de Dióxido de Titanio (TiO₂) a la mezcla le aporta propiedades descontaminantes y autolimpiantes.

En una investigación realizada desde el IDEC se experimentó con placas de concreto, frisadas por una de sus caras con morteros contentivos de Dióxido de Titanio, las cuales se colocaron en cámaras herméticas llenas de aire contaminado con alto contenido de Dióxido de Nitrógeno (NO₂) (imagen 8). Luego de tres días de asoleamiento había desaparecido todo el

Dióxido de Nitrógeno, a diferencia de una cámara patrón contentiva de una placa igualmente frisada, pero sin Dióxido de Titanio, en la cual se mantuvo casi intacto el Dióxido de Nitrógeno (Goncalves, 2020).

Avances en la tecnología del concreto

Motivado por la búsqueda de un material más ecológico, cuyo empleo no solo impacte menos al medio ambiente sino que contribuya de manera positiva en su protección, existe una fuerte tendencia internacional hacia el desarrollo de nuevas tecnologías asociadas a la elaboración y uso del concreto. Como consecuencia, el concreto hoy día ha evolucionado profundamente, experimentando cambios trascendentales en sus propiedades y comportamiento. A continuación se recoge una síntesis de algunos de los adelantos más importantes que se han logrado o están en desarrollo a nivel internacional.

Aditivos superplastificantes más adiciones puzolánicas

Los aditivos plastificantes tienen más de un siglo de existencia, pero fue a mediados del siglo XX cuando se comenzaron a utilizar de forma masiva en la elaboración de concreto para la construcción. A partir de entonces comen-

Imagen 7. Ceniza de cascarilla de arroz



Fuente: Águila, 2012.

Imagen 8. Experimento de descontaminación del aire



Fuente: Goncalves, 2020.

zaron a desarrollarse nuevas variantes que mejoraron gradualmente su efectividad hasta lograr generaciones de plastificantes de muy alto rango a los que se les llamó superplastificantes. A día de hoy se sigue mejorando el desempeño de estos aditivos con lo cual se ha podido reducir drásticamente la cantidad de agua necesaria para el amasado del concreto. Con la reducción de la relación agua/cemento (a/c) se ha podido incrementar considerablemente la resistencia a compresión del concreto y con esto se ha ido extendiendo su uso a aplicaciones mucho más exigentes desde el punto de vista estructural.

Por otro lado han aparecido algunos desechos de otras producciones que poseen propiedades puzolánicas, como la Microsílice. La incorporación combinada de aditivos superplastificantes y adiciones puzolánicas ha provocado mejoras notables en algunas de las principales propiedades del concreto. El resultado es que en la actualidad se han desarrollado nuevas variantes de concreto, entre las que destacan: concreto de alta resistencia, concreto de alto desempeño y concreto autocompactante.

Concreto de alta resistencia

En concretos ordinarios la relación a/c suele rondar el valor de 0,50 y a veces es mucho mayor. Rara vez se utilizan relaciones a/c inferiores a 0,40. En estas condiciones, utilizando Cemento Portland Ordinario, resulta difícil lograr valores de Resistencia a Compresión superiores a 450 kgf/cm².

La utilización de aditivos superplastificantes ha permitido reducir la relación agua/cemento a valores inferiores a 0,30. Utilizando una combinación de adiciones puzolánicas con aditivos superplastificantes en obra se han logrado concretos con resistencias a compresión cercanas a 1000 kgf/cm². A nivel de laboratorio los avances son mucho mayores.

Las Torres Petronas en Kuala Lumpur (Malasia), culminadas en 1998 con una altura de 452 m, fueron los primeros edificios más altos del

mundo hechos con estructura de concreto. El Burj (torre) Khalifa en Dubai, es actualmente el edificio más alto del mundo con una altura de 828 m y sus columnas son de concreto con resistencia a compresión de 970 kgf/cm² (Aldred, 2012).

Lograr concretos mucho más resistentes permite trabajar con secciones transversales de concreto más racionalizadas con el consiguiente ahorro de materiales y de todos los recursos asociados a estos, así como la disminución de las formas de contaminación ya mencionadas.

Concreto de alto desempeño

El Concreto de Alto Desempeño es un término que se utiliza mucho en la actualidad entre los investigadores del concreto. Se trata de concretos donde se combinan: muy buena trabajabilidad, alta resistencia y gran durabilidad. Comportamiento superior al concreto tradicional en otras propiedades también suele considerarse alto desempeño.

Como se mencionó anteriormente, la combinación de superplastificantes y puzolanas mejora considerablemente la resistencia mecánica. El superplastificante tiene un efecto muy positivo en la trabajabilidad y en la reducción de agua. Las puzolanas permiten reducir la cantidad de cemento, lo cual contribuye a disminuir la retracción y el calor de hidratación del concreto y con esto su impermeabilidad y como consecuencia su durabilidad.

El Puente Confederación en Canadá tiene una longitud de 12,9 km y fue construido en 1997, en un ambiente marino agresivo, con fuertes heladas. Se utilizó concreto de alto desempeño que combinó resistencia a compresión de 830 kgf/cm² con asentamiento de 20 cm. Aquí, el criterio de alto desempeño incluyó además, la resistencia a las heladas, por lo cual se agregó aire dentro de la masa de concreto. La dosificación utilizada por m³ incluyó 450 kg de cemento más microsílice, 153 l de agua, 3 l de superplastificante y 160 ml de agente inclusor de aire (Metha, 2000).

Concreto autocompactante

Los aditivos superplastificantes permiten producir mezclas de concreto muy fluidas sin que se produzcan segregaciones. Esto posibilita utilizarlo en casos donde la compactación es complicada. Este es el caso de los inmensos bloques de anclaje del puente Akashi Kaikyo en Japón, construido en 1998, donde en cada uno se vertieron 290.000 m³ de concreto con un aditivo superplastificante y además 150 kg/m³ de polvo de roca caliza (Metha, 2000).

Nanotecnología en el concreto

Como en muchas áreas de la ciencia y la tecnología, en el área de la construcción y en particular en la tecnología del concreto se están desarrollando nuevas y promisorias aplicaciones de la nanotecnología.

En este trabajo se muestran tres avances tecnológicos basados en la aplicación de la nanotecnología en la producción de concreto, a partir de la incorporación de partículas extrafinas en la mezcla en estado fresco.

Adiciones minerales activas extrafinas

La microsílice es la adición puzolánica más efectiva de todas las investigadas hasta el momento. Esto se debe principalmente a que está formada por sílice amorfa con más de un 90% de pureza y además a la enorme finura que se puede lograr en su proceso de obtención. Sin embargo, mediante procesos nanotecnológicos, esa finura puede incrementarse mucho más, hasta tamaños de granos de unas decenas de nanómetros, transformándose en Nanosílice.

Utilizando Nanosílice se han logrado mejoras notables en el concreto como, por ejemplo:

- Concreto con altas resistencias iniciales y finales. Se han logrado resistencias de 75 MPa a 1 día, 90 MPa a 28 días y 120 MPa a 120 días.
- Concreto con alta trabajabilidad. Admite relaciones agua/cemento de 0,20 sin necesidad de superplastificantes.
- Alta impermeabilidad.

- Menor costo por obra comparado con la suma de microsílice y superplastificante. Con 9 kg de nanosílice se sustituyen 70 kg de microsílice más superplastificante.

Nanotubos de carbono

Los “nanotubos de carbono” son el material más fuerte conocido por el hombre. Se consideran 100 veces más fuertes y resistentes que el acero, y su peso es 1/6 del peso de éste. Actualmente, la mayoría de los estudios de nanotecnología se enfocan en estos nanotubos (Duchitanga, 2012).

El efecto físico del reforzamiento del concreto con nanotubos de carbono consiste en impedir la propagación de las grietas propias del proceso de elaboración. La adición de nanotubos mejora la calidad de las nanoestructuras de la pasta de cemento en las zonas de transición entre la pasta de cemento y los agregados, así como en el resto de la pasta de cemento. Con esto se aumenta la resistencia a tracción y se reduce la fisuración. Según Ladeira y otros (2016), al añadir al cemento un 0,3% de nanotubos de carbono se incrementa la resistencia a compresión del concreto en 7,3%, en tanto que para un 0,2% de adición de nanotubos de carbono la resistencia a tracción se eleva en 39,1%.

Nano partículas funcionales

Actualmente se encuentran en desarrollo una variedad de partículas nanoestructuradas que añadidas a la mezcla de concreto le aportan propiedades que lo convierten en un material mucho más útil y atractivo.

a) Dióxido de Titanio.

El Dióxido de Titanio (TiO₂) es una sustancia química muy blanca que actúa como fotocatalizador de las reacciones de oxidación y reducción de las sustancias contaminantes del aire. La fotocatalisis descompone más rápidamente los agentes contaminantes transformándolos en sustancias mucho menos agresivas. Acelera unos procesos de oxidación que en la naturaleza tendrían lugar de una forma muy lenta. Así

los Óxidos de Nitrógeno (NO_x) se transforman en Nitratos (NO_3), los Óxidos de Azufre (SO_x) en Sulfatos (SO_4) y los Contaminantes Orgánicos Volátiles (COV), como las fases aromáticas de los hidrocarburos, en Carbonatos (CO_3). Los iones NO_3 , SO_4 y CO_3 , así como las sales de Nitrato de Calcio ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$), Carbonato de Calcio (CaCO_3) y Sulfato de Calcio (CaSO_4) que se pueden formar a partir de ellos, son fácilmente arrastrados por el agua de lluvia hacia el suelo.

Se han desarrollado aplicaciones de este material para edificaciones y pavimentos en varios países, siendo pionera en esto la empresa italiana Italcementi. Algunas investigaciones han tratado de cuantificar el efecto en la contaminación de la utilización del material. Por ejemplo, “en una ciudad como Madrid, con 2.500 horas de sol al año, una fachada de 1.000 m^2 descontaminaría el NO_x generado por unos 150 coches de gasolina al año, declaró Mariana Díez, Directora de Marketing del área de Cementos de Lafarge en España” (UNOI, 2012). Experimentos muestran que 1000 metros cuadrados de superficie fotocatalítica son capaces de limpiar un volumen de aire de 200.000 metros cúbicos cada 10 horas de irradiación (Israel, 2005). En ensayos de laboratorio efectuados en el Instituto de Tecnología Química de la Universidad Politécnica de Valencia (España) un mortero alcanza una actividad de eliminación de NO de $18 \text{ mg/m}^2/\text{h}$ (UNOI, 2012). Desde el punto de vista económico hay que reconocer que los concretos fotocatalíticos elaborados por la empresa Italcementi son entre 9 y 12 veces más caros que el concreto ordinario, sin embargo, se colocan en obra en delgadas capas de pocos milímetros de espesor. En las obras que se han construido nunca sobrepasan del 15% del total del concreto utilizado (Israel, 2005).

b) Microcápsulas de Silicato de Sodio.

El concreto no es un material homogéneo y es frecuente que se encuentren grietas en su masa, debidas al proceso de elaboración o durante su uso. Nuevas investigaciones han desarrollado un concreto capaz de auto-repararse

de esos daños. Michelle Pelletier, de la Universidad de Rhode Island, ha probado la incorporación de microcápsulas de Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) en la mezcla de concreto para reparar grietas. Al producirse una fisura en el concreto, la cápsula se rompe y el Silicato de Sodio entra en contacto con el Hidróxido de Calcio, generado durante la hidratación del cemento. Esto produce una reacción química que da lugar a una sustancia gelatinosa que rellena la fisura y en aproximadamente una semana se endurece (Notario, 2010).

c) Bacterias reparadoras de grietas.

Según CNN en Español (Stewart, 2015) el profesor holandés Henk Jonkers ideó añadir, a la mezcla de concreto, cápsulas de plástico biodegradable que contienen lactato de calcio y un tipo de bacterias capaces de sobrevivir de forma inactiva durante décadas en un ambiente alcalino, duro y seco como es el concreto. Al producirse la fisura en el concreto, se rompe el plástico, el agua penetra y se activan las bacterias. Estas se alimentan del lactato de calcio, combinan el calcio con iones de carbono y forman Carbonato de Calcio. El Carbonato de Calcio rellena la grieta y al solidificar, esta queda totalmente sellada con material rocoso.

Robótica en la tecnología del concreto.

Impresoras 3D

La robótica es otra de las ramas de la ciencia, relacionada con la tecnología, que avanza cada vez más en el desarrollo de nuestras vidas. La tecnología del concreto no está ajena a esta nueva realidad y ya se cuenta con máquinas innovadoras que ejecutan, de manera automatizada, partes importantes de las edificaciones. Por el momento se concentran más en fundaciones y paredes. Las llamadas “Impresoras 3D” para concreto, permiten colocar por extrusión, de forma gradual y continua, capas de concreto que se superponen unas sobre otras hasta conformar los componentes constructivos proyectados. Se distinguen dos tipos de impresoras: las de brazo robótico y las de

tipo pórtico. Según 3Dnatives (2021) las impresoras 3D con brazo robótico son más pequeñas, sencillas y versátiles, en cambio las tipo pórtico tienen más rendimiento y se pueden utilizar en proyectos de mayor envergadura.

Aplicaciones

Con las tecnologías actuales, una de las aplicaciones que tiene mejores perspectivas, por sus tipologías y dimensiones, es la construcción de viviendas. Resulta relativamente sencillo trasladar una de estas máquinas hacia un terreno acondicionado para la construcción de viviendas y producirlas en serie con un uso racional de tiempo y recursos.

La impresión 3D de concreto es una buena solución técnica para la construcción masiva de viviendas de interés social, debido a los beneficios en tiempo, costo y sostenibilidad (Chávez y otros, 2022; Iribar, 2022).

Si bien las experiencias que se tienen tratan de edificaciones relativamente pequeñas, se intenta desarrollar tecnologías que permitan construir edificaciones mayores. Los nuevos avances en la tecnología propician el incremento gradual en las dimensiones de las edificaciones.

Otros

Existen muchas otras investigaciones que avizoran avances sorprendentes en el desarrollo futuro del material y que abren puertas hacia nuevas aplicaciones o hacia mejoras en los usos ya conocidos.

- **Concreto dúctil:** El concreto no es considerado tradicionalmente un material dúctil. Para mejorar esta propiedad, necesaria en algunas aplicaciones, se utilizan refuerzos de acero, vidrio o plásticos, en forma de fibras. En la Universidad de Michigan han ido más allá y han logrado un concreto mucho más resistente a la flexión y que puede doblarse prácticamente en forma de U. Tales concretos combinan cemento con cenizas volantes, utilizan como agre-

gado solo una arena muy fina y se refuerzan con microfibras. Tiene aplicaciones en pavimentos, puentes, concretos arquitectónicos y reparaciones, disminuyendo los daños que puede sufrir por deformaciones de uso, sismos, etc. (Li, 2007).

- **Concreto de ultra alto desempeño:** Se fabrica con materiales convencionales, similares al concreto de alto desempeño, al cual se añaden cuarzo como agregado y refuerzo de fibras de acero, de carbono o poliméricas. Alcanzan resistencias superiores a 1.500 Kg/cm². Suelen tener gran capacidad de deformación dúctil, resistencia a la abrasión similar a una roca natural y son resistentes a la carbonatación y a la penetración de cloruros (Quimbay, 2020).
- **Concreto que absorbe CO₂:** Se produce a partir de Óxidos de Magnesio (MgO) en lugar de Óxidos de Calcio (CaO). Esto posibilita que el concreto absorba cierta cantidad de CO₂ del aire para formar Carbonato de Magnesio (MgCO₃). Según la empresa británica Novacem, que lo fabrica, una tonelada de concreto, durante todo su ciclo de vida, puede llegar a destruir 0,6 toneladas de CO₂ (Sobrevilla, 2016).

Conclusiones

El concreto ha demostrado ser un excelente material de construcción justificado, entre otras razones, por sus excelentes cualidades técnicas, la relativa facilidad de su elaboración y la gran aceptación cultural que posee. Sin embargo los procesos de producción de sus constituyentes, en particular del cemento, generan un impacto apreciable sobre el medio ambiente.

Esta circunstancia ha llevado a que muchos investigadores y profesionales cuestionen su vigencia y traten de buscar otras opciones que puedan sustituirlo con ventajas ecológicas. Algunos llegan a manifestar que debería dejar de utilizarse. Otros tratamos de desarrollar innovaciones tecnológicas que no solo contribuyan

a reducir el impacto sobre el ambiente sino que lleguen a tener un efecto positivo en el mismo.

Los avances tecnológicos aquí mostrados reflejan que existen muchas vías para mejorar el carácter ecológico del concreto. Que existe una amplia gama de materiales que se pueden incorporar a la mezcla de concreto y que

le aportan cualidades nuevas convirtiéndolo en un material diferente al que conocemos de manera tradicional. Que hay un nicho de oportunidades para incursionar en áreas de avanzada como la nanotecnología y la robótica. Todo esto nos permite afirmar que el concreto no está desapareciendo, está evolucionando.

Referencias bibliográficas

- 3Dnatives, (2021). *¿Cómo funciona una impresora 3D de hormigón?*. Extraído el día 09 de Noviembre de 2022 de <https://www.3dnatives.com/es/funcionamiento-impresora-3d-hormigon-120720212/>.
- Acevedo, M.J. (2010). *Sistema de paneles prefabricados de concreto celular como alternativa de cerramientos verticales de bajo peso para la construcción de viviendas*. Tesis de Maestría no publicada, IDEC, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Águila, I. (2012). *Uso de residuos agrícolas en la producción de cementos puzolánicos*. Caracas: Ediciones FAU.
- Aldred, J. (2012). "El concreto en las grandes alturas", *Noticreto*, N° 110 Enero/Febrero 2012.
- Asocreto, (2010). ¿Qué nos espera en la tecnología del concreto luego de 100 años?. *Noticreto 100 Mayo/Junio 2010*: 34-39.
- Báez, R. A. (2016). *Tecnología para la gestión y aprovechamiento de residuos pétreos provenientes de demoliciones como agregados en mezclas de concreto*. Informe final asignatura Proyecto II no publicado, Maestría en Desarrollo Tecnológico de la Construcción, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Cachan, A. (2001). *Cementos*. Encuentro Medioambiental Almeriense: En busca de soluciones, Andalucía.
- Centeno, Y.C. (2010). *Sistema de paneles prefabricados en concreto reforzado con fibras de sisal (Agave Sisalana)*. Tesis de Maestría no publicada, IDEC, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Chávez, E., Rengifo, N. y De La Torre, J. (2022). *Viabilidad de la Impresión 3D de concreto para la constructibilidad de viviendas sociales*. 20th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology. Florida.
- Domoterra (2013). *El cemento y la producción de CO₂*. Extraído el 5 de Mayo de 2017 de <http://www.domoterra.es/blog/2013/04/02/el-cemento-y-la-produccion-de-co2/>
- Duchitanga, J. (2012) *Nanotecnología en la construcción*. Extraído el 12 de Julio de 2016 de <http://www.monografias.com/trabajos90/nanotecnologia-construccion/nanotecnologia-construccion.html>.

- Goncalves, R.M. (2020). *Revestimiento con propiedades autolimpiantes y descontaminantes con adición de dióxido de titanio para exteriores de edificaciones*. Tesis de Especialización, IDEC, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- IndexMundi. (2015). *Cemento hidráulico: Producción mundial, por país*. Extraído el 29 de Junio de 2016 de http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/cement/cement_t22.html
- Iribar, I. (2022). *¿Cómo funciona la impresión 3D en la construcción?*. Extraído el día 09 de Noviembre de 2022 de <https://www.cemexventures.com/es/impresion-3d-en-la-construccion/>.
- Israel, E. (2005). "Desarrollan en Italia un cemento antismog". Extraído el 30 de Junio de 2016 de <https://reforma.vlex.com.mx/vid/desarrollan-italia-cemento-antismog-193868975>.
- Ladeira, L.; Calixto, J.M.; Ladeira, L.O.; De Souza, T.C. y Dias, A.E. (2016). *Resistência Mecânica de Argamassas de Cimento Portland Fabricado com Nanotubos de Carbono*. IX Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas. Rio de Janeiro.
- Li, V. (2007). "Concreto Dúctil" *Construcción y Tecnología*, Mayo 2007.
- Mejías, L.S. (2010). Técnicas de mortero reforzado con mallas de polipropileno J-300 para cerramiento portante de vivienda. Tesis de Maestría, IDEC, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- Mejías, L.S. y Águila, I. (2018). "Estudio de la resistencia a la compresión de morteros a base de cemento, puzolana, y superplastificante para su aplicación en concreto de alta resistencia", *Revista de la Facultad de Ingeniería-UCV* Vol 33-No 3 y 4, pp.: 7-14.
- Metha, P. K. (2000). "Avances en la tecnología del concreto", *Construcción y Tecnología*, Octubre 2000.
- Ministerio de Medio Ambiente (2004). *Guía de mejores técnicas disponibles en España de fabricación de Cemento*. Madrid: Centro de publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio del Ambiente.
- Notario, E. (2010). *Desarrollan un hormigón inteligente capaz de autorrepararse*. Extraído el 2 de Mayo de 2016 de: <https://hipertextual.com/2010/05/desarrollan-un-hormigon-inteligente-capaz-de-autorepararse>.
- Portland Cement Association. (2005). "Construyendo verde con cemento gris", *Construcción y Tecnología*, Febrero 2005, 40-43.
- Quimbay, R. (2020). *Cinco cosas que debes saber del concreto de ultra alto desempeño*. Extraído el 24 de Enero de 2022 de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/cinco-cosas-que-debes-saber-del-concreto-de-ultra-alto-desempeno>.
- Sobrevilla, B. (2016). "El cemento como material esencial para edificaciones que purifiquen el aire, absorbiendo gases de efecto invernadero", *Civilízate* (Revista de la Pontificia Universidad Católica de Perú), N° 8, 2016: pp. 10-11.
- Stewart, A. (2015). "Profesor holandés crea un concreto vivo que se repara a sí mismo". Extraído el 29 de Junio de 2016 de: <http://cnnespanol.cnn.com/2015/05/15/profesor-holandes-crea-un-concreto-vivo-que-se-repara-a-si-mismo>.
- UNOI-Unidad de Orientación Empresarial en Innovación (2012). *Mortero foto catalítico*. Extraído el 29 de Junio de 2016 de <http://enclave.cev.es/unoi/mortero-foto-catalitico/>.