

## PRESENTE Y FUTURO DE LA TECNOLOGÍA DEL CONCRETO. LA EXPERIENCIA DEL IDEC

**Idalberto Águila Arboláez**

Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC), FAU.UCV.  
idalbertoaguila@gmail.com

### RESUMEN

El concreto producido a partir de cemento Portland es originario del siglo XIX. Desde ese momento y hasta hace pocas décadas experimentó muy pocas variaciones en la tecnología para su producción y uso. Sin embargo, desde finales del siglo pasado se han venido incorporando nuevos materiales y desarrollando nuevas técnicas de elaboración, las cuales han provocado cambios trascendentales en sus propiedades y sus posibilidades de utilización. En este artículo se ofrece una panorámica de algunas de las principales tendencias de la innovación en el área de la tecnología del concreto. Se parte del análisis del impacto ambiental que genera la producción y uso de concreto, de la forma tradicional, lo cual sirve de fundamento para las investigaciones que se adelantan a nivel internacional y en particular en Venezuela. A partir de aquí se realiza una revisión de los avances internacionales más importantes, tomando en cuenta la bibliografía especializada más actualizada. Seguidamente se muestran resultados de las investigaciones más recientes y las nuevas propuestas del Grupo de Concreto del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción. La revisión refleja cómo se trabaja en busca de la racionalidad, la economía y sobre todo la sostenibilidad del planeta. Se destaca una fuerte tendencia a la utilización de adiciones puzolánicas y aditivos superplastificantes, tanto en forma separada como combinadas, para mejorar considerablemente algunas de las principales propiedades del concreto. Igualmente, la nanotecnología se aplica en la elaboración de concreto, con la incorporación de nanopartículas, que en unos casos mejoran apreciablemente algunas de sus propiedades y en otros aportan funciones novedosas al material. Entre otras destacan: reducir la contaminación del aire, aportar al concreto la capacidad de autolimpiarse de la contaminación, así como de autorrepararse, sellando las grietas que normalmente y por diversas causas aparecen en los elementos fabricados con este material.

**Palabras clave:** sostenibilidad, concreto, tecnologías constructivas, nuevos materiales.

## **A MODO DE INTRODUCCIÓN**

El crecimiento poblacional y el desarrollo económico mundial, sobre todo de los países del llamado Tercer Mundo y en especial del sureste de Asia, han traído como consecuencia una fuerte presión sobre el medio ambiente, lo cual es motivo de preocupación global. En particular la actividad de la construcción se presenta como uno de los factores que mayor impacto provoca sobre la naturaleza.

No se puede hablar de construcción sin mencionar a los materiales de construcción, como ya hoy no se puede hablar de materiales de construcción obviando su impacto ambiental. Pocas actividades humanas afectan tanto al medio ambiente como la producción y uso de materiales de construcción.

A los ritmos actuales de consumo de materiales de construcción, se prevé un futuro insostenible para una actividad que constituye un elemento básico para el desarrollo económico de estos países. La construcción es fundamental para garantizar la eliminación de la pobreza y mejorar el bienestar de la población en general.

Si bien los patrones de consumo de materiales, en estos momentos, ponen en peligro la sostenibilidad del planeta, tampoco se puede garantizar un mundo sostenible con los niveles actuales de pobreza y subdesarrollo. Se trata entonces de encontrar fórmulas que permitan mantener y acelerar los ritmos de desarrollo actuales pero disminuyendo el impacto que este provoca en el medio ambiente.

El concreto en particular merece una atención especial. Si bien su impacto ambiental por unidad de medida puede ser inferior a otros materiales estructurales, como el acero o el aluminio, los grandes volúmenes que se necesitan en la mayoría de las obras, hace que se requieran esfuerzos importantes para utilizarlo de manera mucho más racional y tratar de ahorrarlo sustancialmente.

La tecnología para la elaboración y uso del concreto permaneció poco alterada desde su descubrimiento en el siglo XIX hasta finales del siglo XX, momento en que comenzó una verdadera revolución, que continúa y se acelera actualmente. Cada día surgen en muchos países, nuevos adelantos, sobre todo materiales que se adicionan a las mezclas de concreto para mejorar sus propiedades. Esto se traduce en reducciones en su consumo y en aportes de propiedades y posibilidades de utilización que lo hacen más ecológico.

En este artículo se presenta una revisión de algunos de los avances más importantes que se han logrado a nivel internacional, con énfasis en la experiencia del Grupo de Concreto del Instituto de Desarrollo Experimental de la Construcción (IDEC).

## **1. ARTÍCULO**

### **1.1. Impacto ambiental de la producción y uso del concreto**

Establecer de manera precisa y completa el impacto ambiental que genera la producción y uso del concreto es una tarea compleja y se aleja de los objetivos de este trabajo. Sin embargo, un análisis aproximado de las formas en que la producción de cada uno de sus constituyentes impacta sobre el ambiente, puede ofrecer una idea de si se está dando un uso adecuado a este maravilloso material y, sobre todo, cuáles son aquellos procesos donde se puede incidir de manera más decisiva para disminuir ese impacto.

### 1.1.1. Cemento

El cemento es el constituyente principal del concreto. Es quien le da esa capacidad aglomerante de, en una primera fase, tener una consistencia líquida o pastosa, adoptando casi cualquier forma, y luego fraguar y endurecer hasta adquirir una consistencia sólida y convertirse en una roca.

Pero desde el punto de vista ambiental es el que mayor impacto genera. Los efectos más notables están en el consumo de materias primas naturales, el consumo energético y las emisiones.

#### 1.1.1.1. Consumo de materias primas naturales

La producción mundial de cemento en el año 2012 (Index Mundi, 2013), supera los 3.830 millones de toneladas (t) anuales. 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 6.128 millones de toneladas de caliza y arcilla de primera calidad, las cuales nunca serán renovadas.

Asociado a la extracción de materias primas aparece otro fenómeno, que es el deterioro de la capa vegetal y de casi todo tipo de vida animal o vegetal, en el área de emplazamiento de la cantera.

#### 1.1.1.2. Consumo energético

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/t de clinker, en tanto que durante el proceso de molienda se consume una energía eléctrica de 90 a 130 Kwh/t de cemento. Según Huete (2000), la producción de cemento en España consume 0,6% de toda la energía que se utiliza en el país.

#### 1.1.1.3. Emisiones

Las principales emisiones se producen durante el proceso de calcinación de las materias primas para la obtención del clinker y están dadas por dos actividades fundamentales: la quema de los materiales usados como combustibles y las reacciones químicas que se producen durante la formación de los componentes del clinker.

Los principales contaminantes que se emiten en este proceso, reconocido por la literatura técnica y de acuerdo con las regulaciones de la comunidad europea, son:

- Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y otros compuestos nitrogenados: entre 0,4 kg y 6 kg de óxido de nitrógeno por tonelada de clinker.
- Dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y otros compuestos sulfurosos: entre 0,02 kg y 7 kg de óxidos de azufre por tonelada de clinker.
- Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ): entre 800 kg y 1.040 kg de dióxido de carbono por tonelada de clinker.
- Partículas
- Otras emisiones de compuestos orgánicos volátiles, metales y sus compuestos, así como dioxinas y furanos.

### 1.1.2. Agregados

No existen datos precisos de la producción de agregados a nivel mundial, como tampoco existen cifras sobre la elaboración de concreto. Para determinar en qué orden estarían esas cifras, se pueden hacer unas suposiciones, que podrían estar más o menos alejadas de la realidad, pero que darían una idea de la misma. Si se supone, lo cual no es exactamente así, que todo el cemento que se produce en el mundo es para hacer concreto y partimos de que, aproximadamente, se requieren  $0,8 \text{ m}^3$  de piedra y  $0,5 \text{ m}^3$  de arena por  $\text{m}^3$  de concreto, los 3.830 millones de toneladas de cemento que se producen anualmente requerirían cerca de 29.499 millones de toneladas de agregados y producirían alrededor de 36.975 millones toneladas de concreto.

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 generan:

- Consumo energético: los equipos de extracción, las plantas trituradoras y los vehículos de transporte consumen mucha energía tanto eléctrica como de combustibles fósiles.
- Emisión de partículas: las canteras y procesadoras de agregados suelen producir mucha contaminación en sus alrededores debido a la gran cantidad de partículas de polvo que emiten.
- Hidrocarburos volátiles: los vehículos de transporte de materias primas y agregados se caracterizan por emitir grandes cantidades de hidrocarburos volátiles, producto de la quema de los combustibles en sus motores.
- Destrucción de la capa vegetal: para explotar una zona con rocas apropiadas en la producción de agregados, normalmente se necesita retirar primeramente la capa vegetal para dejar al descubierto la roca.

### 1.1.3. Agua

Con el mismo nivel de imprecisión para las estimaciones, se puede suponer que se requieren alrededor de 200 litros de agua para el mezclado de  $1 \text{ m}^3$  de concreto. Entonces, se puede estimar que para producir esos 29.499 millones toneladas de concreto se requieren 2.611 millones de  $\text{m}^3$  de agua de constitución. A estos hay que añadir que para el curado se consumen entre 15 y 50 litros de agua por  $\text{m}^2$  de superficie de concreto. Igualmente, gran cantidad de agua se consume para la limpieza de las herramientas. En este caso, además, se impacta el ambiente por el hecho de que normalmente esa agua no solo se gasta, sino que se contamina, en primer orden, con cemento, y normalmente se vierte en el subsuelo generando importantes focos de contaminación. Una cifra que se puede manejar es que para la limpieza de un camión trompo se requieren alrededor de  $2,25 \text{ m}^3$  de agua por camión por día.

## 1.2. Avances tecnológicos en la elaboración de concreto en el mundo

Existe una fuerte tendencia internacional hacia el desarrollo de nuevas tecnologías asociadas a la elaboración y uso del concreto. Como consecuencia, se han experimentado cambios trascendentales en las propiedades del material. En este trabajo se recoge una síntesis de algunos de los adelantos más importantes que se han logrado o están en desarrollo. En este caso se reseñan experiencias relacionadas con la utilización de aditivos superplastificantes, combinados con adiciones puzolánicas, y avances en la aplicación de la nanotecnología en el concreto.

### 1.2.1. Utilización de aditivos superplastificantes combinados con adiciones puzolánicas

Los aditivos plastificantes tienen más de un siglo de existencia, pero fue a mediados del siglo XX que se comenzaron a utilizar de forma masiva en la elaboración de concreto para la construcción. A partir de aquí comenzaron a desarrollarse nuevas variantes que mejoraron gradualmente su efectividad, hasta lograrse décadas después generaciones de plastificantes de muy alto rango a los que se les llamó superplastificantes. Al 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.

A finales de los años sesenta aparecieron superplastificantes de corta vida a base de sulfonatos de naftaleno y sulfonatos de melamina. Luego, en los ochenta, surgieron superplastificantes de larga vida producidos con sales de ácido carboxílico, amidas y anhídrido carboxílico, así como el policarboxilato. Hoy abundan superfluidificantes de larga vida a base de naftaleno y polímeros de sulfonato melamina.

La Ley de Abrams establece que la resistencia a compresión del concreto es inversamente proporcional a la relación agua/cemento ( $a/c$ ) empleada en su dosificación. Como consecuencia, la reducción de la relación  $a/c$  que se ha podido lograr con la incorporación de aditivos superplastificantes, ha permitido incrementar considerablemente la resistencia a compresión del concreto. Con esto se ha extendiendo su uso a aplicaciones mucho más exigentes desde el punto de vista estructural.

Por otro lado, igualmente, en las últimas décadas han aparecido algunos desechos de otras producciones que poseen propiedades puzolánicas. Esto significa que al añadirse al concreto reaccionan con la cal que se origina durante las reacciones de hidratación del cemento, para formar compuestos cementantes que aportan resistencias mecánicas adicionales al material.

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
- Concreto autocompactante

#### 1.2.1.1. 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  $450 \text{ kg/cm}^2$ .

La mejora gradual en el desempeño de los aditivos plastificantes ha llevado al surgimiento de una nueva generación de estos, llamados superplastificantes. Su utilización ha permitido reducir drásticamente la relación agua/cemento en la mezcla a valores inferiores a 0,30, con el consecuente incremento de la resistencia a compresión del concreto. Utilizando una combinación de adiciones puzolánicas con aditivos superplastificantes se han logrado en obra concretos con resistencias a compresión cercanos a  $1.000 \text{ kg/cm}^2$ . Al nivel de laboratorio los avances son aún mayores.

Las Torres Petronas en Kuala Lumpur, Malasia, con una altura de 452 m, culminadas en 1998, fueron los primeros edificios más altos del mundo hecho con estructura de concreto.

Hasta ese momento los grandes rascacielos se construían con estructura de acero debido a la baja resistencia mecánica del 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 kg/cm<sup>2</sup> (Aldred, 2012).

#### 1.2.1.2. Concreto de alto desempeño

El concreto de alto desempeño es un término que se utiliza mucho en la actualidad entre los investigadores del concreto, quienes lo han definido e interpretado de maneras diferentes. Sin embargo, en general se trata de concretos donde se combinan muy buena trabajabilidad, alta resistencia y gran durabilidad. Sin entrar en discrepancias con otros autores, para este trabajo lo definimos de la siguiente manera:

“Se considerará concreto de alto desempeño aquel que en términos generales supere al concreto tradicional en propiedades esenciales como la trabajabilidad en el estado fresco y la resistencia mecánica y la durabilidad en el estado endurecido. El uso específico que tendrá el concreto determinará el nivel de exigencia en cada una de estas o la consideración de otras propiedades”.

Como se mencionó en el punto anterior, la combinación de superplastificantes y puzolanas mejora considerablemente la resistencia mecánica. El superplastificante tiene un efecto muy positivo en la trabajabilidad, en tanto que 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, construido en 1997 con una longitud de 12,9 km, se construyó con un concreto de alto desempeño que combinó una resistencia a compresión de 830 kg/cm<sup>2</sup>, con un asentamiento de 20 cm. La dosificación utilizada por m<sup>3</sup> de concreto incluyó 450 kg de cemento más puzolana (microsílice), 153 l de agua, 3 l de superplastificante y 160 ml de agente inclusor de aire (Metha, 2000).

#### 1.2.1.3. Concreto autocompactante

Los aditivos superplastificantes permiten producir mezclas de concreto muy fluidas sin que se produzcan segregaciones. Esto permite utilizarlo en casos donde la compactación es complicada por razones del volumen o la forma del molde y del refuerzo de acero. Este es el caso de los anclajes del puente Akashi Kaikyo en Japón, construido en 1998, donde en cada uno se vertieron 290.000 m<sup>3</sup> de concreto con un aditivo superplastificante y, además, 150 kg/m<sup>3</sup> de polvo de roca caliza (Metha, 2000).

#### 1.2.2. Aplicación de la 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 prometedoras aplicaciones de la nanotecnología.

En esta ponencia se muestran tres avances tecnológicos basados en la aplicación de la nanotecnología a la producción de concreto, a partir de la incorporación de partículas ultrafinas en la mezcla en estado fresco. Entre otras experiencias se ha trabajado en: la incorporación de adiciones minerales activas ultrafinas como la nanosílice, que mejoran las principales propiedades del concreto, la utilización de nanotubos de carbono como refuerzo

del concreto, que aumentan su resistencia y disminuyen la fisuración, así como nanopartículas funcionales incorporadas al cemento, que destruyen contaminantes atmosféricos o que permiten al concreto autorrepararse ante la aparición de fisuras.

#### 1.2.2.1. Adiciones minerales activas extrafinas

La microsílíce es la adición puzolánica más efectiva de todas las investigadas hasta el momento. Esto se debe principalmente a que poseen más de 90% de pureza en cuanto a la cantidad de sílice presente en la misma, mayormente en estado amorfo 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 nanosílíce.

Utilizando nanosílíce se han logrado mejoras notables en el concreto, como las siguientes (IMCYC, 2010):

- 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 microsílíce y superplastificante (9 kg de nanosílíce sustituyen a 70 kg de microsílíce más superplastificante).

#### 1.2.2.2. Nanotubos de carbono

Los "nanotubos de carbono" son el material más fuerte conocido por el hombre. Mientras un cable de acero de alta resistencia de 0,56 milímetros de espesor puede soportar un peso de, aproximadamente, 102 kg, un cable de nanotubos del mismo grosor puede soportar un peso de hasta 15,3 toneladas. Se consideran 100 veces más fuertes y resistentes que el acero y su peso es 1/6 del peso de este. Además, conducen la electricidad mejor que el cobre y son buenos conductores de calor. Actualmente, la mayoría de los estudios de nanotecnología se enfoca 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) y 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 0,3% de nanotubos de carbono, se incrementa la resistencia a compresión del concreto en 7,3%, en tanto que para 0,2% de adición de nanotubos de carbono la resistencia a tracción se eleva en 39,1%.

#### 1.2.2.3. Nanopartículas funcionales

Actualmente se encuentra 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. Se distinguen y muestran aquí, en primer lugar, las nanopartículas de dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ), que actúan como catalizadores, acelerando la destrucción natural

de contaminantes atmosféricos, a la vez que aporta a las superficies de concreto un efecto autolimpiante. En segundo lugar se presentan dos formas de aportar propiedades de autorregeneración al concreto agrietado: las microcápsulas de silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) y las bacterias reparadoras de grietas.

#### 1.2.2.3.1. Dióxido de titanio

El dióxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) es una de las sustancias químicas más blancas que existen. Refleja prácticamente toda la radiación visible que le llega y mantiene su color pase lo que pase cuando otros compuestos se decoloran con la luz. Se encuentra en la naturaleza en varias formas: rutilo (tetragonal), anatasa (octaédrico) y brookita (ortorrómbico).

El  $\text{TiO}_2$  es un semiconductor que actúa como fotocatalizador de las reacciones de oxidación y reducción de las sustancias contaminantes del aire. La fotocatalisis, gracias a la energía procedente de la luz, descompone más rápidamente los agentes contaminantes y acelera unos procesos de oxidación que en la naturaleza tendrían lugar de una forma muy lenta. Así, los  $\text{NO}_x$  se transforman en  $\text{NO}_3$ , los  $\text{SO}_x$  en  $\text{SO}_4$  y los COV en  $\text{CO}_3$ .

Las reacciones de oxidación-reducción iniciadas por la fotocatalisis transforman los óxidos de nitrógeno en sales de nitrato de calcio y los contaminantes volátiles orgánicos (como las fases aromáticas de los hidrocarburos, las dioxinas, etc.) en agua y dióxido de carbono. Los iones  $\text{NO}_3$ ,  $\text{CO}_3$  y  $\text{SO}_4$ , así como las sales  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$  son fácilmente arrastrados por el agua de lluvia hacia el suelo.

Actualmente se han desarrollado aplicaciones de este material en varios países, siendo pionera en esto la empresa italiana Italcementi. Se ha utilizado en edificaciones y en pavimentos.

Algunas investigaciones han tratado de cuantificar el efecto en la contaminación de la utilización del material:

- En una ciudad como Madrid, con 2.500 horas de sol al año, una fachada de 1.000 m<sup>2</sup> descontaminaría el NO<sub>x</sub> 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 1.000 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 UPV (España), un mortero alcanza una actividad de eliminación de NO de 18 mg/m<sup>2</sup>/h.

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 han construido nunca sobrepasan del 15% del total del concreto utilizado (Israel, 2005).

#### 1.2.2.3.2. Microcápsulas de silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

El concreto no es un material homogéneo y es frecuente que se encuentren numerosas grietas en su masa debido a efectos del proceso de elaboración o durante su uso. Nuevas investigaciones han desarrollado un concreto capaz de autorrepararse de esos daños.



Michelle Pelletier, de la Universidad de Rhode Island, ha probado la incorporación de microcápsulas de silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) en la mezcla de concreto para reparar grietas. Al producirse algún tipo de fisura en la masa de concreto, la cápsula se rompe y el silicato de sodio entra en contacto con el hidróxido de calcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ , generado durante la hidratación del cemento. Se produce una reacción química que da lugar a una sustancia gelatinosa que en, aproximadamente, una semana se endurece (Notario, 2010).

#### 1.2.2.3.3. Bacterias reparadoras de grietas

Según CNN en Español (Stewart, 2015), el profesor holandés Henk Jonkers ideó añadir a la mezcla 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, que es un mineral llamado calcita, el cual conforma la roca caliza.

### 1.3. Experiencia del Grupo de Concreto del IDEC

El Grupo de Concreto del IDEC, desde su condición de investigadores de una institución académica, se ha planteado contribuir a la reducción del impacto ambiental de la construcción con una serie de investigaciones, entre las que destacan las siguientes:

#### 1.3.1. Sustitución de cemento por materiales puzolánicos

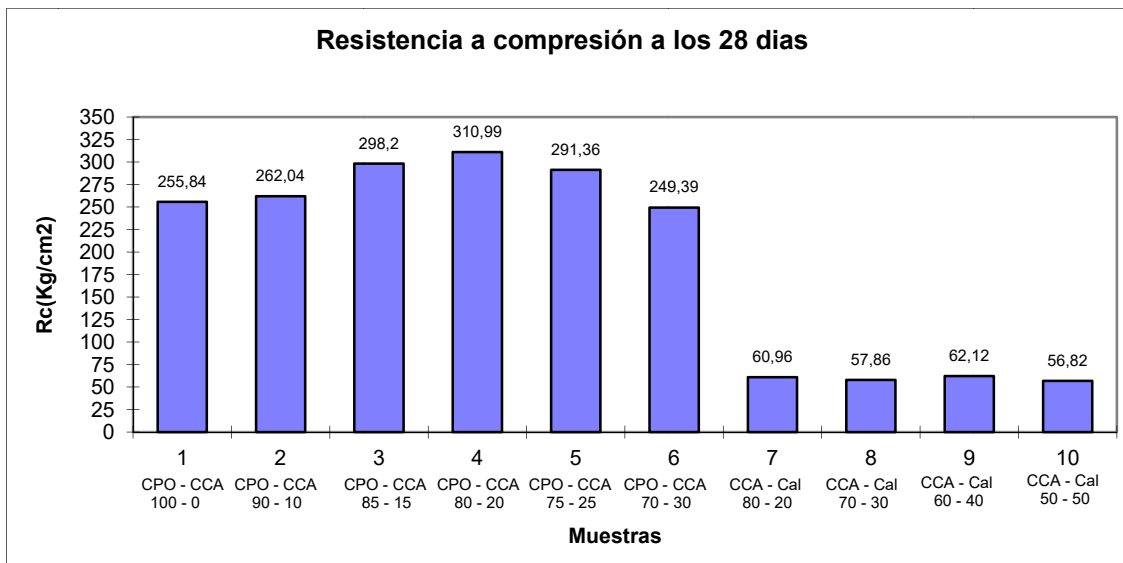
Si el cemento representa el material que mayor impacto genera sobre el ambiente, además de lo que se pueda lograr por reducir el consumo de concreto en general, se debe y existen notables posibilidades de reducir la cantidad de cemento a colocar dentro del concreto. La vía más importante que se explora en estos momentos para disminuir el consumo de cemento es las adiciones puzolánicas.

En el IDEC hemos estudiado las cenizas de algunos residuos agrícolas con capacidad puzolánica, entre las que destaca la cascarilla de arroz (figura 1), que permite sustituir hasta 25% de cemento por ceniza, sin afectar, o incluso mejorando algunas de sus principales propiedades.



**Figura 1:** Ceniza de cascarilla de arroz a la salida del horno. (Elaboración propia).

La figura 2 muestra el comportamiento a compresión de mezclas elaboradas con diferentes proporciones de cemento Portland ordinario (CPO) y ceniza de cascarilla de arroz (CCA), así como algunas combinaciones de CCA con cal. Los resultados muestran un incremento en la resistencia a compresión en la medida en que se incrementa el porcentaje de sustitución de cemento por cenizas hasta 20%, que es el óptimo a partir del cual comienzan a disminuir los valores de resistencia.



**Figura 2:** Resultado del ensayo de resistencia a compresión de materiales puzolánicos. (Elaboración propia)

### 1.3.2. Sustitución del acero de refuerzo por materiales alternativos no metálicos

La producción del acero, utilizado como refuerzo en el concreto armado, produce también un importante impacto sobre el ambiente, sobre todo en el consumo de materias primas y de

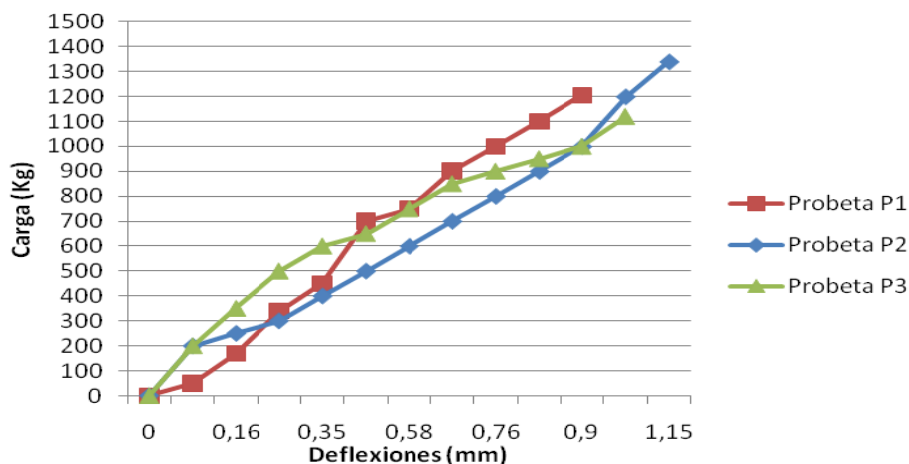
recursos energéticos. Existen numerosos materiales que con mayor o menor eficacia se estudian para aportar al concreto las propiedades que le proporciona el acero. Se han utilizado, tanto elementos alargados en forma de barra, en plástico, fibra de vidrio, etc. como pequeñas fibras de plástico o vegetales. Una de las alternativas más reconocidas constituye la utilización de fibras de sisal, un producto vegetal renovable y que se puede cultivar convenientemente.

En la investigación realizada como trabajo de grado, por la arquitecta Yuraima Centeno, bajo la tutoría de la arquitecta Milena Sosa y de este autor, se desarrolló una propuesta de paneles prefabricados de concreto reforzado con fibras cortas de sisal para su uso como cerramiento de viviendas (figura 3).



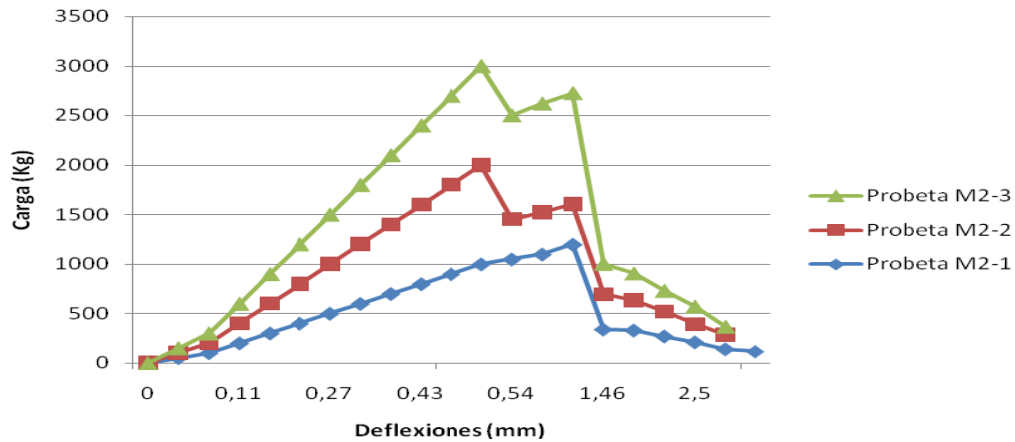
**Figura 3:** Probeta de mortero reforzado con fibras de sisal ensayado a la flexión.

El trabajo demuestra cómo el comportamiento del concreto a la flexión y su ductilidad mejoran con la colocación de fibras repartidas en su masa. La figura 4 muestra el comportamiento a la flexión de una probeta de mortero simple (sin fibras), apreciándose una carga de rotura a la flexión promedio de alrededor de 1.200 kg, con un fallo brusco o frágil, para valores de deformación máximos de 1 mm, aproximadamente.



**Figura 4:** Resultados del ensayo de flexión de muestra de mortero simple. Elaborado por Yuraima Centeno.

La figura 5, en cambio, muestra el comportamiento de una muestra de concreto reforzado con fibras, donde la carga de rotura promedio alcanza los 2.000 kg, aproximadamente, con una deformación máxima de 3 mm, ambos superiores a la muestra patrón y sobre todo con un tipo de fallo dúctil, lo cual es muy deseable en este tipo de componentes.



**Figura 5:** Resultados del ensayo de flexión de muestra de mortero reforzado con fibras. Elaborado por Yuraima Centeno

Otro ejemplo lo constituye el Trabajo de Grado de la arquitecta Solángel Mejías bajo la tutoría de este autor, en el cual se propone la elaboración de un tipo de ferrocemento, donde las mallas de refuerzo que se utilicen no sean de acero, sino de plástico, aumentando aún más el carácter sostenible de este material (figura 6).



**Figura 6:** Figura 6: Panel de mortero reforzado con mallas de plástico. Fotografía tomada por Solángel Mejía

### 1.3.3. Agregados reciclados

En el Trabajo de Grado de Maestría del ingeniero Reyes Báez, tutorizado por este autor, se utilizaron escombros de concreto recolectados en un vertedero ubicado en la carretera nacional Troncal 9, km 4, del tramo Guanta-Cumaná en el estado Anzoátegui, para estudiar sus posibilidades de utilizarlo en la producción de agregados. Los escombros incluyen fragmentos de concreto, bloques de arcilla, bloques de concreto, mortero de friso y otros residuos orgánicos, metálicos, etc. Los escombros fueron sometidos a un proceso experimental de transformación para convertirlos en agregados, que incluyó:

- Toma de muestras selectiva según los diferentes tipos de escombros.
- Tratamiento previo que incluye una trituración y homogeneización manual, a fin de uniformar las partículas de residuos a un tamaño no mayor a 4", coincidiendo con el tamaño de la abertura de la tolva de entrada de material a la trituradora.
- Trituración que se realiza utilizando una trituradora de mandíbulas, moliendo cada tipo de escombros por separado.
- Cribado mediante el cual el material resultante de la trituración se tamiza a través de una criba N° 4, a fin de separar la fracción fina de la fracción gruesa.

A los agregados obtenidos se les hace una caracterización fisicoquímica que incluye: observación visual de la morfología, análisis granulométrico, peso unitario, impurezas orgánicas, densidad, absorción y análisis químico.

En espera de ensayos posteriores que se harán a mezclas de concreto, la caracterización fisicoquímica realizada hasta el momento, permite concluir que los agregados obtenidos son aptos para utilizarse en concretos no estructurales, sin embargo, combinados con agregados naturales podrían sustituir parcialmente a estos para producir concreto estructural.

### 1.3.4. Concreto de alta resistencia

Si bien el uso del concreto de alta resistencia en el mundo ha estado dirigido a la construcción de edificaciones de gran altura, por las grandes cargas a que están sometidas sus columnas, es posible también utilizarlo en edificaciones más bajas, donde se podrían lograr secciones más racionalizadas de sus elementos estructurales. La tesis doctoral de la arquitecta Solángel Mejías se propone desarrollar un concreto con una resistencia a compresión superior a 700 kg/cm<sup>2</sup>. Para lograrlo se adicionan al concreto un superplastificante y una puzolana. El superplastificante es policarboxilato y la puzolana es microsílíce. El objetivo es utilizar el material en edificaciones de baja altura, logrando elementos estructurales con secciones pequeñas y formas racionalizadas.

Los primeros ensayos a probetas cúbicas de mortero arrojaron valores de resistencia a compresión cercanos a 800 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días, muy superiores a la muestra patrón sin adiciones (figura 7).

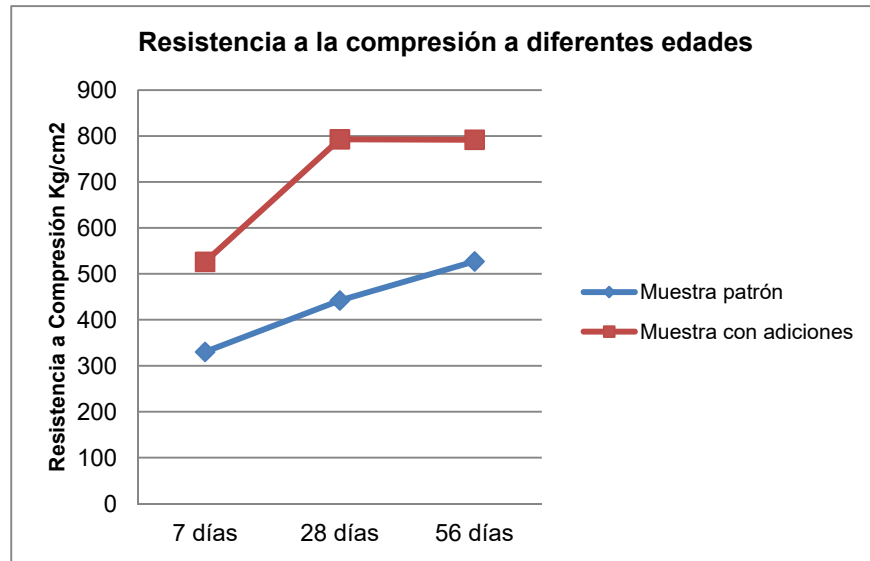


Figura 7: Ensayo de resistencia a compresión. Elaborado por Solángel Mejías

## 2. CONCLUSIONES

Sin dudas la producción y uso del concreto genera un impacto importante sobre el medio ambiente. Esto se debe fundamentalmente a los volúmenes tan grandes de materias primas que consume, el elevado consumo energético, la contaminación ambiental que genera por sus emisiones y la cantidad de escombros que produce al final de su vida útil.

Debido a esto, a nivel mundial se adelantan numerosas investigaciones que hacen cada vez más ecológico el uso de este material. El concreto, con propiedades muy mejoradas respecto al tradicional, así como la aplicación de la nanotecnología, aparece entre los principales avances que se han logrado.

En el IDEC, en particular, se trabaja en la misma dirección y en los últimos tiempos se han desarrollado aportes en el ahorro de cemento y de agregados, sustitución de acero de refuerzo, a la vez que se trabaja también en concretos de alta resistencia como vía para disminuir el consumo de materiales.

## 3. REFERENCIAS

Aldred, J. (2012). El concreto en las grandes alturas. *Revista digital Noticreto*, n° 110, enero/febrero.

Cachan, A. (2001). Cementos. Encuentro Medioambiental Almeriense: En busca de soluciones. Andalucía.

Duchitanga, J. (2012). Nanotecnología en la construcción. Extraído el 12 de julio de 2016 de: <http://www.monografias.com/trabajos90/nanotecnologia-construccion/nanotecnologia-construccion.shtml>.

Huete, R. (2000). Aproximación a un proyecto de construcción sostenible. Curso de ampliación de conocimientos "La sostenibilidad de la construcción", Caracas, UCV.

IMCYC (2010). Nanoaditivos para el concreto. *Construcción y Tecnología*, octubre, México.

Index Mundi (2013). 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](http://www.indexmundi.com/en/commodities/minerals/cement/cement_t22.html).

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*. Río de Janeiro.

Metha, P.K. (2000). Avances en la tecnología del concreto. *Revista Construcción y Tecnología*, octubre, México.

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-autoreparase>.

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 (2012). Mortero foto catalítico. Tomado el 29 de junio de 2016 de: <http://enclave.cev.es/unoi/mortero-foto-catalitico/>.