

# Influencia del volumen de fibras y curado posterior sobre el comportamiento post – fisura de un concreto de ultra alto desempeño

## Influence of fiber volume and subsequent curing on post - crack behavior of an ultra high performance concrete (UHPC)

Nicolás González\*, Jesús Castaño\*, Yezid Alvarado<sup>1</sup>\*, Isabel Gasch\*\*

\* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. COLOMBIA

\*\* Universitat Politècnica de València, Valencia. ESPAÑA

Fecha de Recepción: 28/07/2014

Fecha de Aceptación: 25/11/2014

PAG 220-233

### Resumen

En el presente artículo se evalúa el desempeño de un concreto de ultra alto desempeño reforzado con diferentes contenidos de fibras metálicas, el cual fue elaborado utilizando materiales accesibles en Colombia y con técnicas de fabricación convencional, es decir no se utilizaron presiones o temperaturas elevadas en la fabricación de los diferentes especímenes. A este concreto de ultra alto desempeño se le realizaron pruebas de resistencia a la compresión uniaxial, resistencia a la flexión y de igual forma se evaluó el comportamiento de viguetas fisuradas a diferentes edades, las cuales fueron sometidas a diferentes tiempos de curado, con el fin de determinar la resistencia residual a flexión de las mismas. Se ha observado que el contenido en fibras y la adherencia que se genere entre las mismas y la matriz de concreto son aspectos de gran importancia, con el fin de garantizar que no haya pérdida de la resistencia a la flexión, independientemente de la edad de fisuración.

**Palabras claves:** Concreto de ultra alto desempeño, resistencia a la compresión, post-fisura, concreto reforzado con fibras, resistencia a la flexión

### Abstract

*In this paper the performance of an Ultra-High Performance Concrete (UHPC) reinforced with different contents of metal fibers is evaluated. This concrete was produced using materials available in Colombia and conventional manufacturing techniques; ie no high temperatures or pressures in the manufacturing of different specimens were used. This UHPC was tested for uniaxial compressive strength and flexural strength. Furthermore, we evaluated the behavior of different ages cracked joists of different ages, which were subjected to different curing times in order to determine the residual bending strength., was evaluated. It has been observed We observed that the fiber content and adhesion to be generated between them the fibers and the concrete matrix are matters of great importance, in order to ensure no loss of flexural strength, regardless of the age of the cracking.*

**Keywords:** Ultra high performance concrete (UHPC), compressive strength, postcracking, fiber reinforced concrete, flexural strength

## 1. Introducción

En la década de los 90's autores como Bouygues (Resplendido, 2004) o Reda et al. (1999) dieron los primeros pasos en la investigación de Concreto de Ultra Alto Desempeño (Ultra High Performance Concrete, UHPC). La primera aplicación en ingeniería civil fue en 1997 en un puente peatonal en Sherbrooke, Canadá (Resplendido, 2004; Acker et al., 2004). Posteriormente se utilizó en otros ámbitos como la construcción de las plantas de energía de Cattenom y Civaux (Resplendido, 2004) o investigaciones sobre el comportamiento de tubos de acero rellenos con UHPC (Tue et al., 2004).

Teniendo en cuenta las mejoras que se han realizado frente a la resistencia a la compresión del concreto, con el paso del tiempo la definición del concreto de alta resistencia ha ido variando. Es por esto que el Comité 363 del American Concrete Institute (ACI), reconoce que la definición de concreto de alta resistencia está en función de una base geográfica, dado que depende de las resistencias a la compresión que se producen comercialmente en cada región (ACI Committee 363, 2010).

## 1. Introduction

*In the 90's, authors such as Bouygues (Resplendido, 2004) or Reda et al. (1999) took the first steps in research of Ultra High Performance Concrete (UHPC). The first application of UHPC in civil engineering was in 1997 for a pedestrian bridge in Sherbrooke, Canada (Resplendido, 2004; Acker et al., 2004). Later, it was used in other areas such as in the construction of the Cattenom and Civaux power plants (Resplendido, 2004) or research about the performance of steel tubes filled with UHPC (Tue et al., 2004).*

*While improvements have been made in concrete's ability to withstand compression, the definition of high-strength concrete has been changing over time. This is why the American Concrete Institute's Committee 363 recognizes that the definition of high-strength concrete is based on the specific geographical area, since it depends on the compression strengths that are produced in each region (ACI Committee 363, 2010).*

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:

Pontificia Universidad Javeriana. Calle 40 No. 5-50 Ed. José Gabriel  
Maldonado, S.J., Bogotá, Colombia. Tel.: +57 13208320 (ext. 2718); fax: +57  
13208320 (ext. 5398)  
E-mail: [alvarado.y@javeriana.edu.co](mailto:alvarado.y@javeriana.edu.co)



Hoy en día existen muy pocas metodologías para el diseño de mezclas de concretos, cuyas resistencias a la compresión superen los 83MPa, a excepción del modelo desarrollado por De Larrard (1999) para dosificar varios tipos de concretos, ya sean convencionales o de altas prestaciones. El hecho de que no existan metodologías simplificadas para el diseño de mezclas de concretos de alta resistencia, hace atractiva la exploración de este campo, en busca de relaciones que se puedan interpretar en pro de la utilización de estos materiales en la industria.

Una de las características principales de las mezclas resultantes es su alta concentración de material cementante. Varios autores recomiendan contenidos de material cementante superiores a los 900 kg, el cual está compuesto entre un 20% y un 25% por humo de sílice y por cemento (Wang et al., 2012). De la misma manera, es importante utilizar altas dosis de súper-plasticizantes, con el fin de reducir representativamente la relación agua/cemento (Yang et al., 2010).

Si se añaden fibras metálicas en el proceso de mezcla del concreto, éstas mejoran considerablemente las resistencias a impacto, fatiga y flexión, de tal manera que ofrece gran variedad de prestaciones, superioridades técnicas y económicas. El concreto de ultra-alto desempeño reforzado con fibras metálicas es un candidato viable para superar la baja resistencia a la tensión y la ausencia de ductilidad del mismo, siendo estas, características inherentes al concreto convencional.

Al añadir fibras metálicas a la mezcla de concreto, la ductilidad aumenta (Oh, 1992; Oh, 1994), su capacidad de carga también mejora (Ashour et al., 1993), la resistencia a esfuerzos cortantes (Campioni et al., 2008). Por otro lado, diversos autores (Ashour et al., 2000; Chunxiang et al., 1999) investigaron acerca del comportamiento a flexión de vigas elaboradas utilizando concreto reforzado con fibras de alta resistencia.

Con el fin de determinar cuál es la que sería la combinación óptima de materiales para una mezcla de concreto reforzado con fibras metálicas, es necesario hacer pruebas experimentales, de resistencia a la compresión, junto con ensayos de fluidez de la mezcla, teniendo en cuenta que el volumen máximo de fibras a usar sin afectar la manejabilidad es del 2.0% (Markovic, 2006).

Han sido diversos los autores que han estudiado los diversos métodos de auto-reparación (Jonkers et al., 2010; Van Tittleboom et al., 2010). Se cree que las propiedades de auto-reparación de los materiales cementantes, es una combinación de procesos físicos y químicos, entre los cuales están la formación de carbonato de calcio o hidróxido de calcio (a), pérdida de partículas de concreto en la fisuración del mismo (b), un proceso de hidratación adicional del cemento que no se hidrató (c) y expansión de la matriz de concreto en la zona de fisuración (d), dados los altos contenidos del mismo y la baja relación agua cemento (Wu et al., 2012). Los beneficios de la auto-reparación abarcan no solo la reducción de costos de mantenimiento y reparación, sino también una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que la producción de concreto es muy agresiva con el ambiente.

*Today, there are only a few methodologies for the design of concrete mixtures with compression strength levels above 83MPa, with the exception of the model developed by De Larrard (1999), to measure various types of concrete, both conventional and high performance concrete. Given that there are no simplified methodologies for high-strength concrete mixtures, research in this area is very attractive, so as to find relationships that can be used to support the implementation of these materials in the industry.*

*One of the main characteristics of these mixtures is the high concentration of cement material. Some authors recommend that the content of cement material be above 900 kg., which is composed of between 20% to 25% of silica fume and cement (Wang et al., 2012). Likewise, it is important to use high doses of super-plasticizers so as to proportionately reduce the ratio of water/cement. (Yang et al., 2010).*

*If metallic fibers are added into the process of the concrete mixture, they considerably improve the impact, fatigue and bending strengths, offering a large variety of applications, as well as technical and economic advantages. The ultra-high performance concrete, reinforced with metallic fibers, is a viable candidate to overcome low tensile strength and a lack of ductility of the concrete which are inherent characteristics of conventional concrete.*

*Adding metallic fibers to the concrete mixture increases ductility (Oh, 1992; Oh, 1994), weight-bearing capacity (Ashour et al., 1993), and shear stress strength (Campioni et al., 2008). On the other hand, multiple authors (Ashour et al., 2000; Chunxiang et al., 1999) researched the flexural performance of beams made of concrete that was reinforced with high strength fibers.*

*To determine the optimal combination of materials for the concrete reinforced with metallic fibers, experimental compression strength tests were required, in addition to fluidity trials of the mixture, while considering that the maximum volume of fibers that can be used without an impact to handling is 2%. (Markovic, 2006).*

*Many authors have researched multiple self-healing methods (Jonkers et al., 2010; Van Tittleboom et al., 2010). It is believed that the self-healing properties of cement materials are a combination of physical and chemical processes, including (a) the formation of calcium carbonate or calcium hydroxide, (b) the loss of concrete particles in the cracking of the concrete, (c) an additional hydration process of the cement that was not hydrated, and (d) the expansion of the concrete matrix in the cracked area given the high cement content and the low ratio of water and cement (Wu et al., 2012). The self-healing benefits include not only the reduction of maintenance and repair costs, but also the reduction of CO<sub>2</sub> emissions, since concrete production is very harmful to the environment.*



El objetivo de esta investigación, es lograr desarrollar un UHPC cuya resistencia a la compresión sea superior a los 150 MPa, mediante la utilización de materiales de fácil acceso en Colombia y métodos de preparación que no requieran de la implementación de altas presiones ni generar calor adicional al generado por la hidratación, dado que la implementación de dichas técnicas, es muy difícil de controlar y de proporcionar a las estructuras una vez se hace el vaciado de los diferentes elementos estructurales y no estructurales en un proyecto convencional de ingeniería.

Además, se busca evaluar el comportamiento mecánico a flexión del UHPC fisurado, después de someterlo a diferentes tiempos de curado húmedo para evaluar si hay auto-reparación en el concreto.

## 2. Metodología

### 2.1 Caracterización de los materiales

Con el fin de caracterizar los componentes de la mezcla se realizaron los ensayos físico-químicos que se detallan a continuación:

- Caracterización morfológica de los materiales granulares a usar en el diseño de mezcla por medio de granulometría mediante la técnica del tamizado (ASTM C117).
- Realización de la granulometría de los agregados finos (cemento, humo de sílice y polvo de cuarzo) a usar en el diseño de mezcla mediante la técnica laser para polvos.
- Caracterización físico-mecánica de los cementantes por medio de los ensayos de compresión en cubos (ASTM C109) e índice de actividad resistente (ASTM C311).
- Caracterización química y mineralógica del cemento por medio de la difracción de rayos X (DRX).

### 2.2 Estudio del comportamiento mecánico del material

Para estudiar el comportamiento mecánico de los UHPC se realizaron ensayos de resistencia a la compresión de acuerdo a la norma ASTM C39. Posteriormente se llevó a cabo el ensayo de módulo de rotura, tal y como se especifica en la norma ASTM C580, y por último se realizó el ensayo de resistencia residual a la flexión instantánea conforme a la norma ASTM C1399.

### 2.3 Comportamiento post-fisura de los UHPC

Se buscó evaluar el comportamiento mecánico a flexión de los UHPC fisurados, después de someterlos a diferentes tiempos de curado húmedo. Para ello, se llevaron las probetas prismáticas a fisura controlada en la máquina universal hasta una flecha de 0.2 mm. (ASTM C1399). Dichas probetas se almacenaron por tiempos de 7 y 28 días y posteriormente se determinó el comportamiento de las muestras mediante el ensayo de resistencia a la flexión post-curado (ASTM C1399).

*The objective of this research is to develop a UHPC with compression strength above 150 MPa, using materials that are easy to obtain in Colombia and preparation methods that do not require high pressure nor do they create additional heat which generating hydration. The implementation of these techniques is difficult to control and to provide to structures once the different structural and non-structural elements in a conventional engineering project have been poured.*

*The goal was also to evaluate the mechanical behavior in response to the flexing of cracked UHPC, after submitting it to different curing periods, so as to evaluate if there is self-healing of the concrete.*

## 2. Methodology

### 2.1 Description of the Materials

*So as to characterize the components of the mixture, we conducted physical-chemical tests that are described below:*

- *Morphological characterization of the granular materials used in the mixture's design with granulometry using the sieve technique (ASTM C117).*
- *Implementation of the granulometry of the fine-grained inputs (cement, silica fume, and quartz dust) of the mixture, by using the laser technique for dust.*
- *Physical-mechanical characterization of the cementing materials, using compression cube tests (ASTM C109) and strength activity index (ASTM C311).*
- *Chemical and mineral characterization of the cement, using x-ray diffraction (DRX).*

### 2.2 Analysis of the material's mechanical performance

*To study the mechanical performance of the UHPCs, we conducted compression strength tests in accordance with standard ASTM C39. Then a modulus of rupture test was implemented, in line with standard ASTM C580; finally, a test of sudden residual flexural strength in accordance with standard ASTM C1399.*

### 2.3 Post-cracking performance of the UHPC

*We evaluated the flexural mechanical performance of the cracked UHPC, after subjecting them to different periods of humid curing. To achieve that, prismatic samples were taken to a controlled crack in a universal machine until a deflection of 0.2 mm. (ASTM C1399). Those samples were stored for periods of 7 to 28 days, and then the responses of the samples were determined with a post-curing flexural strength test (ASTM C1399).*



### 3. Análisis de resultados

El concreto de ultra-alto desempeño (UHPC) desarrollado en esta investigación, es una clase de polvo reactivo (Aïtcin, 2000; Richard et al., 1995). La dosificación del material que lo compone, fue realizada mediante la distribución de Fuller. Los concretos producidos, fueron realizados con altos contenidos de material cementante (Cemento y Humo de Sílice), y baja relación agua/cemento. La arena fina, con un diámetro máximo de 500  $\mu\text{m}$ , y el polvo de cuarzo, con un diámetro medio de 18  $\mu\text{m}$ , fueron utilizados como áridos.

#### 3.1 Caracterización de los materiales

Las propiedades de los materiales individuales tales como la distribución granulométrica, masa específica y compacidad experimental, fueron determinadas y utilizadas de manera experimental.

Los materiales utilizados para la fabricación de los hormigones de ultra-altas resistencias fueron: cemento Portland; humo de sílice; dos clases de arenas: la primera (polvo de cuarzo) tiene unas dimensiones de granos entre 2.4 y 85  $\mu\text{m}$  y la segunda (arena-60) entre 140 y 500  $\mu\text{m}$ ; fibras de acero (diámetro de 18 $\mu\text{m}$ , longitud de 13 mm y densidad de 7.90  $\text{g}/\text{cm}^3$ ); y el aditivo súper-plastificante a base de poliacarboxílicos modificados.

Los valores de la densidad del cemento y del humo de sílice, presentados en la Tabla 1, fueron determinados por medio del Frasco de Le Chatelier de acuerdo con los procedimientos establecidos por la norma ASTM C188. La gravedad específica y absorción de la arena-60 y el polvo de cuarzo, fueron determinados teniendo en cuenta los procedimientos establecidos en la norma ASTM C128.

### 3. Analysis of results

The high performance concrete (UHPC) created in this research is a type of reactive powder (Aïtcin, 2000; Richard et al., 1995). The Fuller distribution method was used to determine the dosages of materials composing the concrete. The concrete mixtures produced were made with high levels of cement material (cement and silica fume) and a low water/cement ratio. Fine-grain sand, with a maximum diameter of 500  $\mu\text{m}$ , and quartz powder, with an average diameter of 18  $\mu\text{m}$ , were used as dry ingredients.

#### 3.1 Characterization of the Materials

The properties of the individual materials, such as the granulometric distribution, specific mass and experimental compactness, were determined using an experimental method.

The materials used to manufacture the ultra-high resistant concrete were: Portland cement; silica fume; a super-plasticizer additive based on modified polycarboxylics, and two types of sand: the first (quartz powder) has granular dimensions between 2.4 to 85  $\mu\text{m}$  and the second type (sand-60) between 140 to 500  $\mu\text{m}$ ; steel fibers (diameter of 18 $\mu\text{m}$ , length of 13 mm and density of 7.90  $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

The density values of the cement and silica fume, presented in Table 1, were determined with the Le Chatelier Flask, in line with standard ASTM C188. The specific gravity and absorption values for sand-60 and quartz powder were determined in line with the procedures established in standard ASTM C128.

**Tabla 1.** Densidad de los materiales  
**Table 1.** Density of the materials

Material	Densidad/Density ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Cemento/Cement	3.17
Humo de Sílice/Silica Fume	2.65
Arena/Sand – 60	2.59
Polvo de Cuarzo (Arena – 100)/Quartz Powder (Sand – 100)	2.51

La finura del cemento Portland, se determinó utilizando el aparato de Blaine, teniendo en cuenta el procedimiento descrito en la norma ASTM C204. Su superficie específica es de 3796.41  $\text{cm}^2/\text{g}$ . Cabe mencionar, que para el cemento Portland no está especificado este valor en la norma ASTM C1157. La cantidad de agua requerida para preparar pastas de cemento hidráulico, de consistencia normal, para sus ensayos posteriores, fue de 26.1 %.

The fineness of the Portland cement was determined using the Blaine Fineness Apparatus, in line with the procedure described in standard ASTM C204. Its specific surface area was 3796.41  $\text{cm}^2/\text{g}$ . It is important to note that this value is not specified in standard ASTM C1157 for Portland Cement. The amount of water required to prepare hydraulic cement paste, of normal consistency for later tests, was 26.1 %.



Este valor se encontró siguiendo el procedimiento descrito en la ASTM C187. Una vez estipulada la relación agua/cemento adecuada, se comprobó el tiempo de fraguado de dicha pasta, siguiendo los parámetros estipulados en la norma ASTM C191. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos del ensayo de tiempos de fraguado, se registra un tiempo de fraguado inicial y final de 170 min y 210 min, respectivamente. Adicionalmente, en la Tabla 2, se presenta un resumen de los parámetros físicos del cemento Portland.

*This value was determined by following the procedure described in ASTM C187. Once the water/cement ratio was established, the setting time of this paste was measured, following the parameters outlined in ASTM C191. Given the results obtained from the tests of set times, initial and final set times of 170 min. and 210 min. respectively were measured. Table 2 presents a summary of the physical parameters of the Portland cement.*

**Tabla 2.** Parámetros físicos del Cemento Portland  
**Table 2.** Physical Parameters of Portland Cement

Parámetros Físicos/ <i>Physical Parameters</i>	Resultados Proyecto/ <i>Project Results</i>	NTC - 121	ASTM C1157
Tiempo de fraguado inicial, mínimo (min)/ <i>Initial set time, minimum (min)</i>	60	60	45
Tiempo de fraguado final, máximo (min)/ <i>Final set time, maximum (min)</i>	150	600	420
Blaine, mínimo (cm <sup>2</sup> /g)/ Blaine, minimum (cm <sup>2</sup> /g)	3796.41	2800	2800

El método utilizado para evaluar la compatibilidad y el punto de saturación del plastificante sobre las partículas de cemento y el humo de sílice, ha sido el ensayo de fluidez de las pastas a través del ensayo se asentamiento, en el cual, para este tipo de concretos, se verifica que el diámetro de la mezcla sea mayor a 60 cm.

*The method used to evaluate compatibility, as well as the saturation point of the plasticizer on the cement particles and silica fume, was the fluidity test of the pastes with a slump test ; for this type of concrete, we must verify that the diameter of the mixture is over 60 cm.*

El porcentaje de vacíos de las arenas fue determinado por el ensayo de compactación y vibración conforme a los procedimientos descritos en la norma ASTM C29. Este procedimiento se realizó para la Arena-60 y el Polvo de Cuarzo (Arena-100) y sus resultados se observan en la Tabla 3.

*The percentage of voids in the sand was determined by the test of compactness and vibration, in line with the procedures described in standard ASTM C29. The procedure was done with Sand-60 and Quartz Powder (Sand-100), with the results shown in Table 3.*

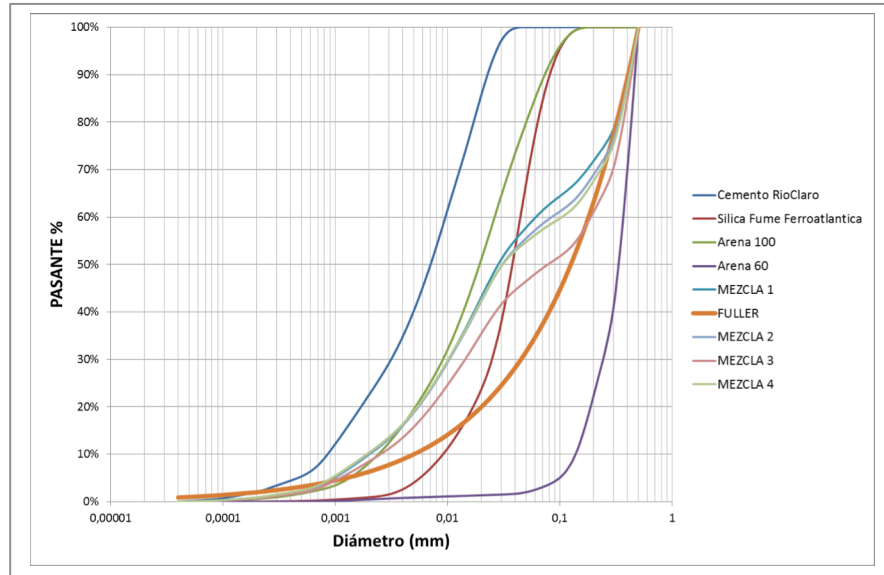
**Tabla 3.** Porcentaje de vacíos de las Arenas  
**Table 3.** Percentage of voids in the Sand

Material		Polvo de Cuarzo/ <i>Quartz Dust</i>	Arena/Sand – 60
Porcentaje de Vacíos/ <i>Percentage of Spaces</i>	Varillado/ <i>Measurement</i>	46.08 %	41.06 %
	Vibrado/ <i>Vibration</i>	39.20 %	36.53 %

Las distribuciones granulométricas del cemento, humo de sílice, polvo de cuarzo (arena-100) y arena-60, que componen la mezcla de concreto, se determinaron por granulometría láser. En la Figura 1, se presentan los resultados de dichas granulometrías, junto con mezclas que se realizaron como parte del programa experimental, con el propósito de evaluar diferentes propiedades, tales como manejabilidad y resistencia a la compresión.

*The granulometric distribution of the cement, silica fume, quartz powder (sand-100) and sand-60 that make up the concrete mixture was determined with laser granulometry. Figure 1 shows the results of these particle size measurements, together with the mixtures that were made as part of the experimental design, so as to evaluate different properties, such as handling and compression strength.*





**Figura 1.** Granulometría láser de los materiales y mezclas propuestas  
**Figure 1.** Laser granulometry of the proposed materials and mixtures

A diferencia de los registros bibliográficos, en Colombia el humo de sílice que está disponible en el mercado no es el material más fino que compone la mezcla, su lugar lo toma el polvo de cuarzo. Este material es el componente que tiene un diámetro lo suficientemente pequeño como para llenar los vacíos entre el cemento y el humo de sílice. Adicionalmente, para hacer el diseño de mezclas, es necesario tener en cuenta la gradación de la Arena-60.

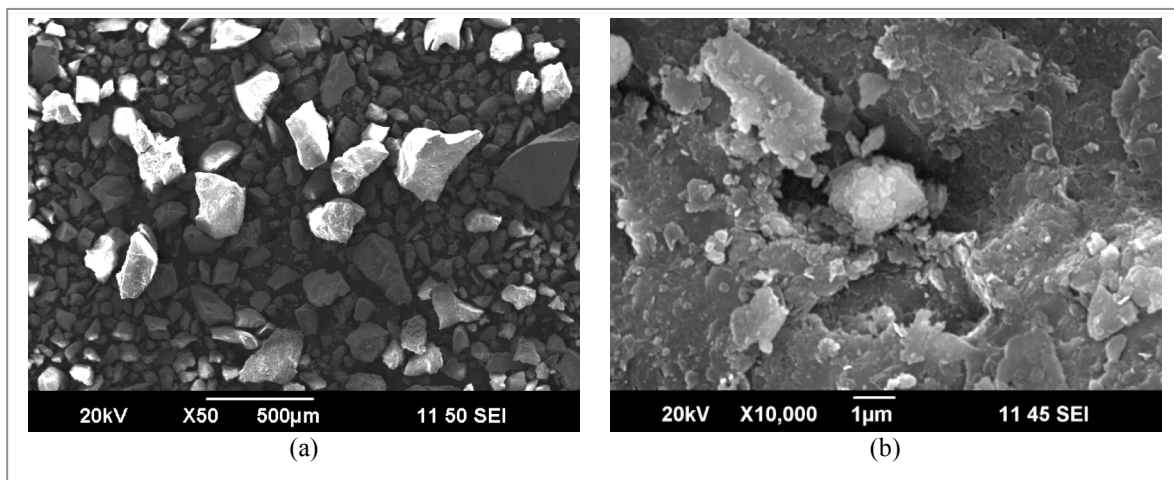
Por medio de una Microscopía Electrónica de Barrido, se pueden observar con detalle las características de cada uno de los materiales que componen la mezcla de concreto.

Tal y como se observa en las Figuras 2 y 3, las partículas de los agregados que componen la mezcla son bastante angulares y las superficies de los mismos no están muy bien definidas. Por esta razón la relación agua/cemento con la que se trabaja en la mezcla no se puede reducir aún más.

*The silica fume available in Colombia is not as finely grained; therefore, differing from the literature, the most finely grained input in our mixtures was quartz sand. This material is a component with a small enough diameter to fill the spaces between the cement and the silica fume. Also, when designing the mixture it was important to keep in mind the gradation of Sand-60.*

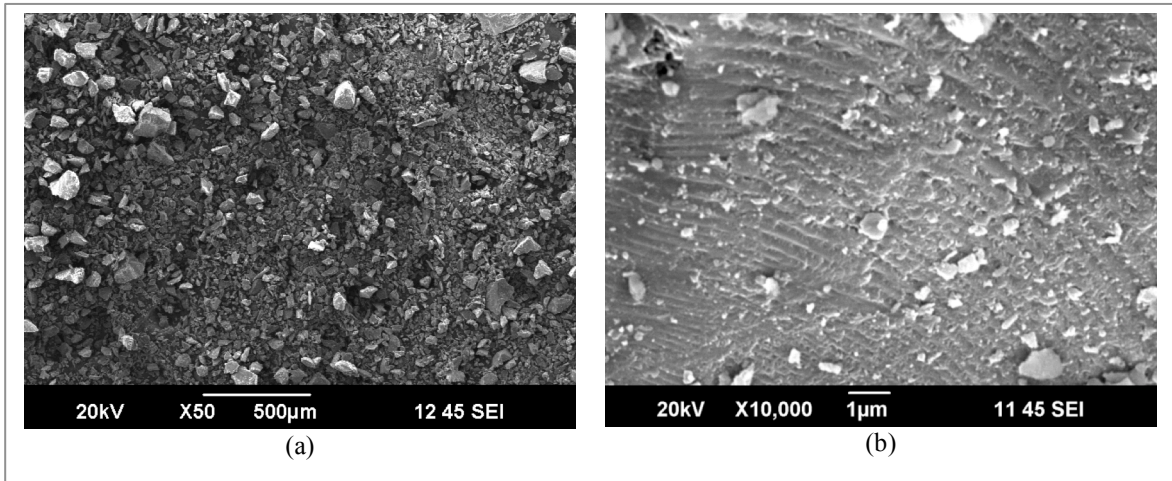
*Using a Scanning Electron Microscope (SEM), we observed the detail of the characteristics of each of the materials in the concrete mixture.*

*As shown in Figures 2 and 3, the particles of the inputs in the mixture are very angular and their surfaces are not well defined. Therefore, the water/cement ratio used in the mixture cannot be further reduced.*



**Figura 2.** MEB, Arena - 60. (a) 50x, (b) 10000x  
**Figure 2.** MEB, Sand - 60. (a) 50x, (b) 1000x

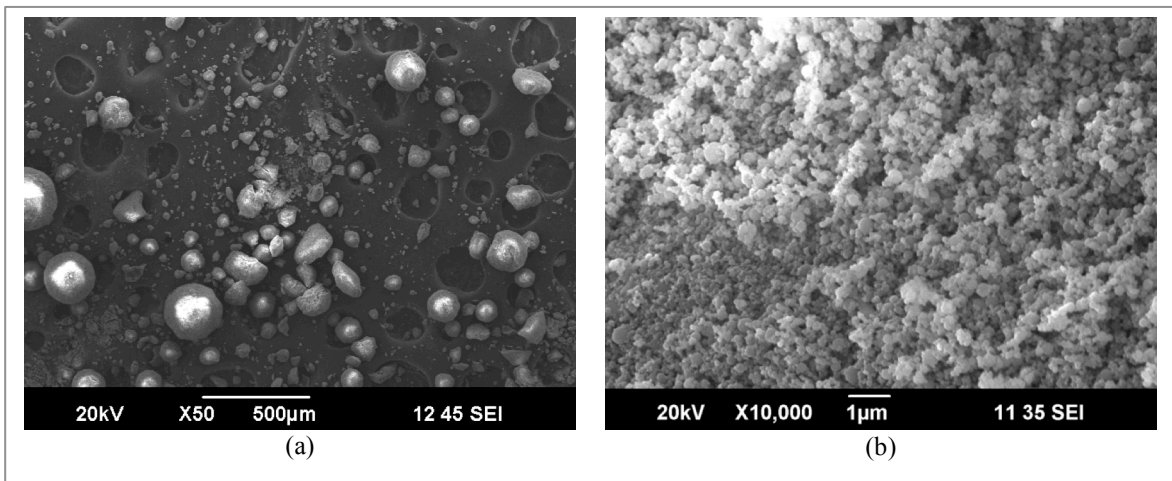




**Figura 3.** MEB, Polvo de cuarzo (Arena – 100). (a) 50x, (b) 10000x  
**Figure 3.** MEB, Quartz powder (Sand – 100). (a) 50x, (b) 1000x

A diferencia de los agregados pétreos, el humo de sílice sí tiene la forma esférica deseada (Figura 4), posibilitando trabajar con relaciones agua/cemento más bajas. Este material, a causa de su alto contenido de sílice, cumple un papel muy importante en la estructura de la pasta de cemento. Actúa como relleno físico, aumentando la compactness de la mezcla. Reduce considerablemente la exudación en el concreto fresco debido a su gran superficie específica y capacidad para retener el agua, y propicia la actividad puzolánica que se genera (Espinoza Montenegro, 2010).

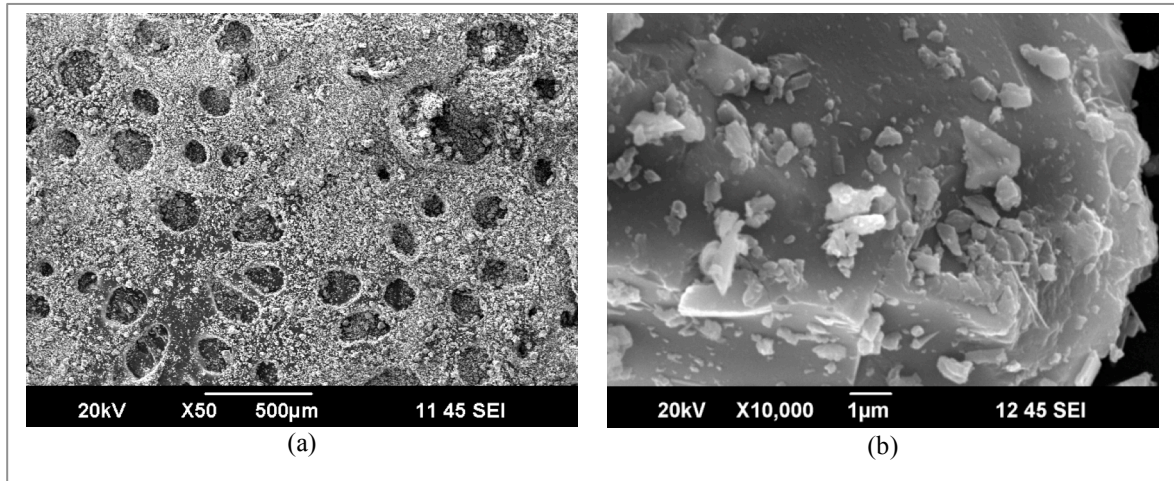
*In contrast with stone inputs, silica fume has the desired spherical form (Figure 4), allowing us to work with lower water/cement ratios. This material, due to its high silica content, plays an important role in the structure of the cement paste. It acts like a physical filler, increasing the compactness of the mixture. It considerably reduces the oozing of the fresh cement due to its large surface area and its ability to hold water, and it favors the Pozzolanic activity that is generated (Espinoza Montenegro, 2010).*



**Figura 4.** MEB, Humo de sílice. (a) 50x, (b) 10000x  
**Figure 4.** MEB, Silica fume (a) 50x, (b) 1000x

Tal y como se observa en la Figura 5(a), el cemento es el material más fino que compone la mezcla, con un diámetro medio de 7 µm. En la Figura 5(b), se percibe que la superficie de los granos de cemento se encuentra bien definida. Éstos presentan una textura suavizada, pero a pesar de todo, no son totalmente esféricas como las del humo de sílice.

*As shown in Figure 5(a), cement is the most finely grained material in the mixture, with an average diameter of 7 µm. In Figure 5(b), we can see that the surface of the cement grains is very well defined. They show a softened texture, and they are not totally spherical, whereas silica fume is spherical.*



**Figura 5.** MEB, Cemento Tipo III. (a) 50x, (b) 10000x  
**Figure 5.** MEB, Cement Type III. (a) 50x, (b) 10000x

### 3.2 Estudio del comportamiento mecánico del material

#### 3.2.1 Mezclas de prueba

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados anteriormente, se planteó una mezcla ideal, la cual se fundamenta en la distribución de Fuller. Variando las proporciones de los materiales que forman parte de la mezcla, se construyeron 4 mezclas de diferentes proporciones, con el propósito de evaluar la manejabilidad y la resistencia a compresión de dichas mezclas.

El diseño de la mezcla del UHPC, se fundamenta en optimizar la densidad de empaquetamiento de los áridos. El objetivo del diseño de la mezcla se obtiene tratando de optimizar de forma independiente las dos fases principales: la fase de pasta, compuesta por el cemento, el humo de sílice, la cantidad de agua en ella y el aditivo súper-plasticante; y la fase de las partículas inertes, la cual, en este caso, está compuesta por el polvo de cuarzo y la arena-60, logrando finalmente la combinación más óptima.

La dosificación de las mezclas se presenta en la Tabla 4, donde se muestra la proporción de los diferentes componentes en relación al contenido de cemento.

### 3.2 Study of the material's mechanical behavior

#### 3.2.1 Test mixtures

We proposed an ideal mixture, as supported by the Fuller distribution and in line with the aspects already mentioned in this paper. By varying the proportions of the materials included in the mixture, we created 4 mixtures with different proportions, so as to evaluate ease of handling and the compression strength of the different mixtures.

The UHPC mixture was designed to optimize the density of the packaging of the dry ingredients. The goal for this mixture is achieved by trying to independently optimize two major phases until the optimal final combination is achieved; the first phase is the paste phase, composed of cement, silica fume, water and the super plasticizing additive; the second is the inert particles phase, which in this case is composed of quartz dust and sand-60.

Table 4 shows the dosages of the mixtures, indicating the proportion of the different components in relation to the amount of cement.

**Tabla 4.** Dosificación de las mezclas en función de la cantidad de cemento  
**Table 4.** Dosages of the mixtures in relation to the amount of cement

Material	Mezcla 1/ Mixture 1	Mezcla 2/ Mixture 2	Mezcla 3/ Mixture 3	Mezcla 4/ Mixture 4
Cemento/ Cement	1.00	1.00	1.00	1.00
Humo de sílice/ Silica fume	0.25	0.25	0.25	0.20
Arena - 60/ Sand - 60	1.00	1.00	1.50	1.00
Polvo de cuarzo/ Quartz dust	0.50	0.25	0.25	0.20
Agua/ Water	0.31	0.31	0.31	0.30
Aditivo/ Additive	0.09	0.075	0.075	0.07

Por medio del arreglo granulométrico de Fuller se observó una proporción óptima de arena-60 y polvo de cuarzo cercana al 80% y 20% respectivamente. Este resultado se le atribuye a que se logra una mejor acomodación de los materiales con los que se realizaron las mezclas empleando esa proporción.

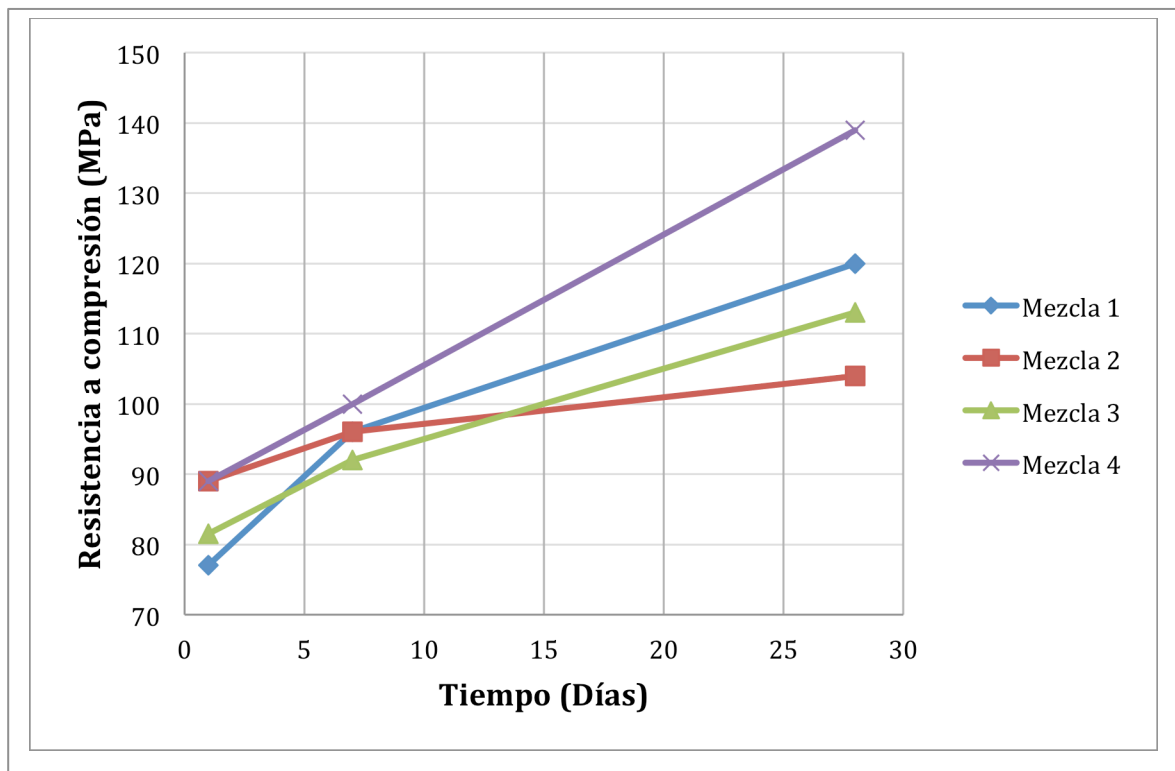
Using a Fuller granulometric composition, we observed the optimal proportion of sand-60 and quartz powder, approximately 80% and 20% respectively. This result is due to the improved accommodation of the materials used in the mixtures in these proportions.





En la Figura 6 se muestran las curvas típicas, para las 4 mezclas, del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial a 1, 7 y 28 días. Los especímenes ensayados, fueron cubos de 50 mm de lado; estos cubos fueron elaborados cumpliendo los parámetros establecidos en la norma ASTM C109. La velocidad de aplicación de la carga fue de 0.13 mm/min.

Figure 6 shows typical curves for the 4 mixtures, for the uniaxial compression strength test at 1, 7 and 28 days. The tested specimens were cubes with sides of 50 mm; these cubes were created following the parameters established in standard ASTM C109. The speed of the application of weight was 0.13 mm/min.



**Figura 6.** Resultados del ensayo de resistencia a compresión de las diferentes mezclas planteadas  
**Figure 6.** Compression strength test results of the different mixtures proposed

Tal y como se observa en la Figura 6 la resistencia a la compresión obtenida a 1 día, fue mayor a 75 MPa en todas las mezclas, siendo estos resultados bastante elevados teniendo en cuenta la temprana edad a la que se realizaron los ensayos.

Una vez realizados los ensayos de resistencia a compresión, se optó por utilizar la mezcla número 4, dado a que tal y como se aprecia en la Figura 6, es la que mayor resistencia a compresión uniaxial adquirió a la edad de 28 días, además cumplió con los requisitos de manejabilidad necesarios.

### 3.2.2 Mezclas con fibras

Debido al buen desempeño de la mezcla, en cuanto a resistencia a la compresión se refiere, se procedió a ensayar la matriz de concreto adicionando a ésta diferentes cantidades de fibras metálicas, las cuales se plantearon con base en un porcentaje sobre el volumen total de la mezcla. De modo que se optó por realizar ensayos de manejabilidad, resistencia a la compresión y módulo de rotura, añadiendo el 0.5%, 1.5% y 2.0% de fibras.

As seen in Figure 6, the compression strength obtained on day 1 was above 75 MPa in all of the mixtures; these results are quite high when accounting for the early age when the tests were done.

Once the compression strength tests were done, we used mixture number 4 since, as shown in Figure 6, it is the mixture with the greatest uniaxial compression strength at an age of 28 days, in addition to fulfilling the handling requirements.

### 3.2.2 Mixtures with fibers

Given the mixture's strong performance, specifically in compression strength, we proceeded to test the concrete mixture by adding different quantities of metallic fibers, which were implemented based on percentages of the total volume of the mixture. We chose to do handling, compression strength and modulus of rupture tests, adding 0.5%, 1.5% and 2.0% of fibers.



El tamaño de las fibras añadidas en la mezcla es muy importante, tanto el grado de ductilidad como la resistencia a tracción de la mezcla de concreto obtenidos. Dependen no solo del tamaño de fibras, sino también del porcentaje de fibras usado por  $m^3$ . Las fibras de acero propuestas para este diseño de mezcla tienen una longitud de 13 mm y un diámetro de 0.018 mm.

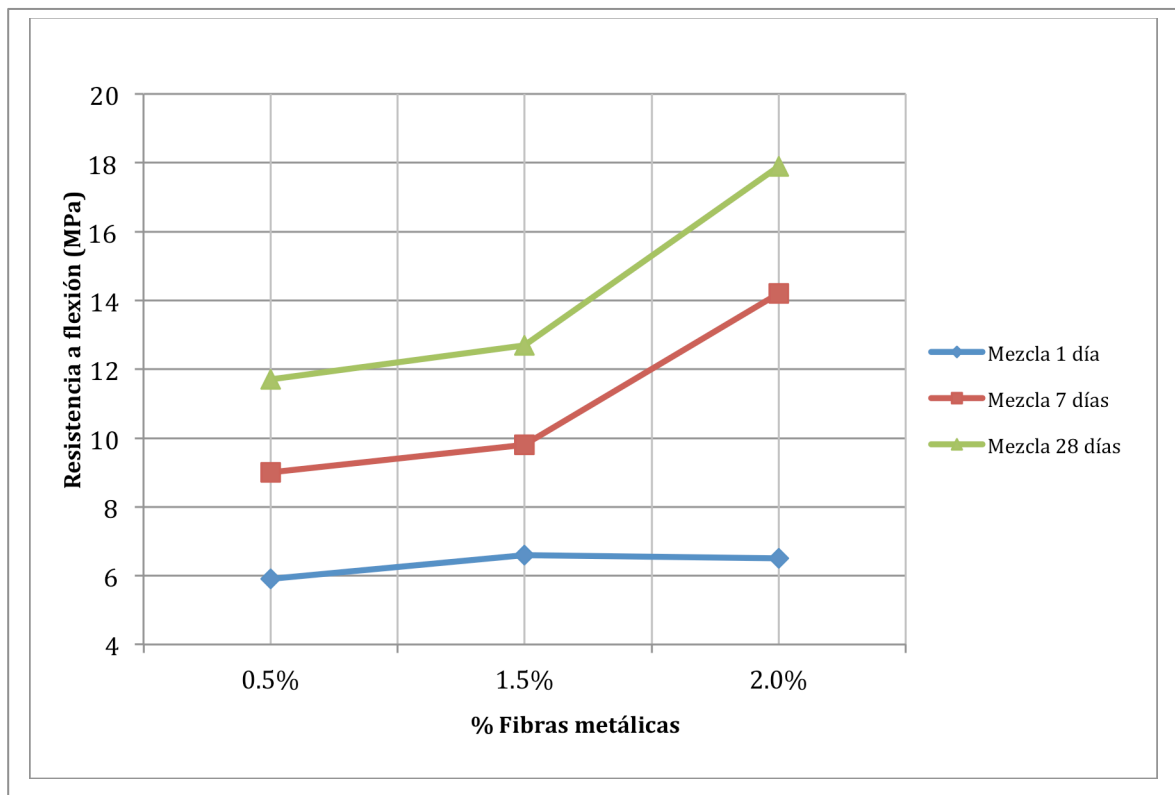
Con el propósito de estimar el módulo de rotura del UHPC con diferentes contenidos de fibras metálicas, se ejecutó una serie de ensayos de resistencia a flexión, siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C580, aplicando la carga a tercios de la luz.

En la Figura 7, se puede observar la tendencia que presenta el esfuerzo máximo de flexión de las viguetas con diferentes contenidos de fibras metálicas, las cuales fueron ensayadas a 1, 7 y 28 días de edad. Tal y como se observa, a 1 día las fibras todavía no están lo suficientemente adheridas y la resistencia a flexión es prácticamente la misma en los diferentes contenidos de fibras. Las muestras que fueron ensayadas a 7 y 28 días, demuestran que la diferencia en el desempeño entre las mezclas que tienen contenidos de fibra metálica inferiores al 2.0% aumenta cuando se tiene un contenido de fibras mayor, de tal forma que el desempeño de las viguetas con 2.0% de fibras es superior respecto al resto.

*The size of the fibers that were added into the mixture is very important. The ductility level and the traction strength of the concrete mixture are also important; they depend not only on the size of the fibers, but also on the percentage of fibers used per  $m^3$ . The steel fibers proposed for this mixture are 13 mm long and 0.018 mm in diameter.*

*To estimate the UHPC's modulus of rupture with different contents of metallic fibers, we implemented a series of flexural strength tests, following the recommendations of standard ASTM C580, applying the weight at one third of the clear span .*

*Figure 7 shows the trend presented by the Maximum Flexural Strength of the joists with different amounts of metallic fibers, tested at 1, 7 and 28 days. We observed that on day 1, the fibers were not yet sufficiently attached and the flexural strength is practically the same for the different amounts of fibers. The samples tested at 7 and 28 days show that mixtures with metallic fiber amounts lower than 2.0% have increased performance when there is a higher fiber content, so the performance of the joists with 2.0% of fibers was superior to the rest.*



**Figura 7.** Comparación esfuerzo de flexión, según la edad de las viguetas  
**Figure 7.** Comparison of flexural strength, according to the age of the joists



### 3.2.3 Comportamiento post-fisura del UHPC con fibras

Sabiendo que la relación agua/cemento empleada es muy baja, y dado el alto contenido de material cementante presente en la mezcla, se asume que durante el proceso de mezclado no todo el contenido de material cementante se alcanza a hidratar.

Con la intención de evaluar un posible proceso de auto-reparación en el concreto, se fisuraron las probetas y se sometieron a un proceso de curado posterior con el propósito de evaluar la resistencia residual media a flexión, teniendo en cuenta la carga registrada a 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 mm de flecha, tal y como se indica en la norma ASTM C1399. Las probetas se fisuraron a 1, 7 y 28 días, sometiendo las probetas a y su reensayo se hizo a 7 y 28 días después de la fecha de fisuración.

En la Tabla 5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos, comparando el esfuerzo máximo a flexión obtenido en las probetas no fisuradas con el de las probetas fisuradas a distintos días, así como con la resistencia residual media a flexión ("ARS" Average Residual Strength) de éstas, obtenida mediante la curva re-carga deflexión de 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 mm como se muestra en la Fórmula 1.

### 3.2.3 Post-crack behavior of fiber-reinforced UHPC

Given the low water/cement ratio, and the high levels of cement material in the mixture, we assumed that not all of the cement material was able to be hydrated during the mixing process.

To evaluate a possible self-healing process of the concrete, the test specimens were cracked and then subjected to a subsequent curing process to measure average residual flexural strength, keeping in mind the weight registered at deflections 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 mm, as indicated in standard ASTM C1399. The test specimens were cracked at 1, 7 and 28 days, and the re-test was done at 7 and 28 days after the cracking date.

Table 5 shows a summary of the results, comparing the Maximum Flexural Strength obtained in the test specimens that were not cracked, against the test samples that were cracked, on different days. This allowed us to measure their Average Residual Strength (ARS), which was obtained with a re-weighted deflection curve of 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 mm, as shown in Formule 1.

$$ARS = \frac{L}{b \cdot d^2} (P_A + P_B + P_C + P_D) \quad (1)$$

Donde,

*L*: Es la luz del elemento (mm)  
*b*: Es el ancho promedio del elemento (mm)  
*d*: Es la altura promedio del elemento (mm)  
(*P<sub>A</sub>* + *P<sub>B</sub>* + *P<sub>C</sub>* + *P<sub>D</sub>*): Es la suma de las cargas para las deflexiones de 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 mm (N).

Where,

*L*: is the element's clear span (mm)  
*b*: is the average width of the element (mm)  
*d*: is the average height of the element (mm)  
(*P<sub>A</sub>* + *P<sub>B</sub>* + *P<sub>C</sub>* + *P<sub>D</sub>*): is the sum of the weights of the deflections of 0.50, 0.75, 1.00 y 1.25 mm (N).

**Tabla 5.** Dosificación de las mezclas en función de la cantidad de cemento  
**Table 5.** Maximum flexural strength and ARS of the test cases of cracked UHPC with fibers

Porcentaje fibras/ Percentage fibers	Ensayo/Test	Sin fisura/ Without cracks	Fisura 1 día/1 day Crack		Fisura 7 días/7 day Crack		Fisura 28 días/28 day Crack	
		Esfuerzo máximo a flexión (MPa)/ Maximum Flexural Strength (MPa)	Esfuerzo máximo a flexión (MPa)/ Maximum Flexural Strength (MPa)	ARS (MPa)	Esfuerzo máximo a flexión (MPa)/ Maximum Flexural Strength (MPa)	ARS (MPa)	Esfuerzo máximo a flexión (MPa)/ Maximum Flexural Strength (MPa)	ARS (MPa)
0.5%	7 días/days	9.05	7.74	7.55	6.81	6.50	7.76	7.41
	28 días/days	11.72	8.16	7.99	8.57	8.36	9.24	7.32
1.5%	7 días/days	9.82	9.85	7.51	11.11	10.60	13.28	12.57
	28 días/days	12.73	11.84	11.43	12.34	12.05	13.95	13.43
2.0%	7 días/days	14.15	16.93	16.88	20.05	17.95	26.77	25.16
	28 días/days	17.82	17.68	15.46	20.74	18.35	30.63	22.82



Como se puede observar en la Tabla 5, las probetas fisuradas alcanzan el módulo de rotura en la mayoría de los casos, llegando incluso a superarlo en algunos de ellos. Se observa por tanto que el proceso de auto-reparación sí que es efectivo, puesto que el material es capaz de asumir el mismo esfuerzo que tenía antes de estar fisurado manteniendo la carga de rotura, o incrementándola, teniendo un comportamiento dúctil.

Así mismo, si se realiza el análisis atendiendo a la cantidad de fibras que tiene la probeta se observa que las viguetas cuyos contenidos son iguales a 0.5%, son las que menos resistencia a la flexión ganaron, mientras que las del 2.0% de fibra, lograron alrededor de un 100% más de resistencia a la flexión. Dados los resultados, es posible apreciar que la ganancia en la resistencia a flexión y auto-recuperación, está altamente relacionada con el aporte que hacen las fibras y con lo bien adheridas que estén.

## 4. Conclusiones

Los concretos de ultra-alto desempeño reforzados con fibras metálicas, fabricados con técnicas convencionales y materiales accesibles en Colombia, tienen cualidades que los destacan en diferentes aspectos y estas características son evidentes cuando se compara con el desempeño de la matriz de concreto sin fibras. Debido a las altas resistencias a la compresión uniaxial, junto con el buen desempeño a flexión que es posible alcanzar, las secciones requeridas en la construcción son mucho menores y por ende más livianas.

Con el fin de obtener el rendimiento deseado, se estudió con detenimiento la relación entre la densidad de empaquetamiento y la capacidad de flujo en estado fresco de este concreto, basándose en la distribución granulométrica propuesta por Fuller. De esta forma, la dosificación propuesta en esta investigación, se fundamentó en el empaquetamiento de los agregados, utilizando materiales bien gradados, cuyos diámetros medios fueran diferentes, con el fin de lograr la mejor compactación posible. La eliminación del agregado grueso, junto con la optimización de la mezcla, permite fabricar concretos más homogéneos y densos, lo cual influye positivamente en sus propiedades mecánicas.

En cuanto a la mezcla propuesta, se puede concluir que al realizar una dosificación con contenidos de fibras metálicas mayores, el comportamiento, tanto a compresión uniaxial como su resistencia a la flexión, es notablemente superior. La adición de fibras metálicas genera el aumento de la capacidad de deformación del concreto, disminuyendo su característica más relevante cuando es sometido a flexión (rotura frágil). De igual forma la utilización de humo de sílice en la dosificación de las mezclas, genera un aumento en la compactación de la mezcla, así mismo se reduce considerablemente la exudación en el concreto fresco debido a su gran superficie específica, permitiendo trabajar con una baja relación agua/cemento.

Por otra parte se evidencia que en todos los casos de análisis propuestos, se origina un proceso de auto-reparación en el concreto, el cual está dado por un proceso de curado posterior a la fisuración del mismo.

*Table 5 shows that the cracked test specimens reach the modulus of rupture in most cases, even going past that in some cases. We therefore observe that the process of self-healing is effective, since the material is able to withstand the same load as before the cracking, or even increase the breaking load, with ductile behavior.*

*When the analysis is focused on the amount of fibers in the test specimen, we observe that the joists with contents equal to 0.5% gained the least flexural strength, while the ones with 2% of fibers showed approximately 100% more flexural strength. Given these results, it is possible to see that the gains in flexural strength and self-healing are highly correlated with the contribution of the fibers and how well they are attached*

## 4. Conclusions

*Ultra-high performance concrete reinforced with metallic fibers, manufactured with conventional techniques and materials available in Colombia, have features that excel in many different aspects; these characteristics are evident when compared with the performance of a concrete matrix without fibers. Given the high uniaxial compression strength, together with the good flexural performance that can be achieved, fewer sections are required in constructions, and they are therefore lighter.*

*To obtain the desired performance, we carefully studied the relationship between packaging density and flow capacity in the fresh phase of the concrete, based on the granulometric distribution proposed by Fuller. The dosages proposed in this research were based on the packaging of the inputs, using finely graded material with different average diameters so as to achieve the highest compactness possible. By eliminating larger sized inputs, together with the optimization of the mixture, we were able to create a more homogeneous and denser concrete, which positively influenced its mechanical properties.*

*For the proposed mixture, we conclude that when creating a dosage with a higher content of metallic fibers, the uniaxial compression as well as flexural strength are notably better. The addition of metallic fibers creates an increase in the concrete to withstand deformation, reducing the most relevant characteristic when it is subject to bending (fragile cracking). The use of silica fume in the mixture's dosage increases the compactness of the mixture, while considerably reducing the exuding of fresh concrete due to its large surface area, allowing us to work with a low water/concrete ratio.*

*We saw that in all of the proposed analyses, there was a self-healing process of the concrete, which is composed of a curing process after the cracking of the concrete.*



De igual manera, tal y como se observa en el análisis expuesto anteriormente, la adherencia de las fibras a la matriz de concreto juega un papel fundamental en la resistencia a flexión de las viguetas. Incluso en las viguetas que fueron fisuradas a los 28 días de edad, donde gran parte del material cementante ya ha sido hidratado, las capacidades mecánicas después de un curado posterior mejoran. Así mismo, la auto-recuperación de la resistencia a flexión del concreto está directamente relacionada con el contenido de fibras que éste tenga. El contenido de fibras debe ser mayor al 1.5%, con el fin de garantizar que, independientemente de la edad de fisuración, no haya pérdida de la resistencia a la flexión, es decir, que ésta se pueda preservar.

*As observed in the analyses indicated above, the adherence of the fibers to the concrete matrix plays a fundamental role in the joist's flexural strength. In fact, for joists that cracked at 28 days of aging, where a large part of the cement material was already hydrated, mechanical abilities improved after the next curing. Likewise, the self-healing of the concrete's flexural strength is directly related to the fiber content of the concrete. The fiber content must be greater than 1.5% to ensure that, independent of the age of the cracking, the concrete can maintain, and not lose, its flexural strength.*

## 5. Referencias/References

- Acker P., Dehloul M. (2004)**, Ductal® Technology: a large spectrum of properties, a wide range of application. En International Symposium on Ultra High Performance Concrete (pp. 11-23). Kessel (Germany), Septiembre.
- Aïtcin P. (2000)**, Cements of yesterday and today: concrete of tomorrow. Cement and Concrete Research, 30(9), 1349 – 1359, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00365-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00365-3).
- American Concrete Institute (2010)**, ACI 363 Report on High-Strength Concrete. American Concrete Institute (ACI).
- ASTM International (2009)**, ASTM C29 Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2014)**, ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2013)**, ASTM C109. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2013)**, ASTM C117 Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2012)**, ASTM C128 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2011)**, ASTM C187 Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2009)**, ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2013)**, ASTM C191 Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2011)**, ASTM C204 Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2013)**, ASTM C311 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2012)**, ASTM C580 Standard Test Method for Flexural Strength and Modulus of Elasticity of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2011)**, ASTM C1157. Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- ASTM International (2010)**, ASTM C1399 Standard Test Method for Obtaining Average Residual-Strength of Fiber-Reinforced Concrete. American Society for Testing and Materials (ASTM).
- Ashour S. A., Wafa F. F. (1993)**, Flexural behavior of high-strength fiber reinforced concrete beams. ACI Structural Journal, 90(3), 279-287, doi: <http://dx.doi.org/10.14359/4186>.
- Ashour S. A., Wafa F. F. y Kamal M. I. (2000)**, Effect of the concrete compressive strength and tensile reinforcement ratio on flexural behavior of fibrous concrete. Engineering Structures, 22(9), 1145-1158, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(99\)00052-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(99)00052-8).
- Campione G., Mangiavillano M.L. (2008)**, Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations. Engineering Structures, 30(11), 2970-2980, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.04.019>.
- Chunxiang Q., Patnaikuni I. (1999)**, Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending. Cement and Concrete Composite, 21(1), 73- 81, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(98\)00040-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(98)00040-7).
- De Larrard F. (1999)**, Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach. London: E&FN Spon.
- Espinoza Montenegro A. A. (2010)**, Estudio de dosificación de hormigón de ultra-alta resistencia, basado en el empaquetamiento de los áridos. (Tesis Máster). Madrid (España): Universidad Politécnica de Madrid.
- Jonkers H., Thijssen A., Muijzer G., Copuroglu O., Schlangen E. (2010)**, Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. Ecological Engineering, 36(2), 230-235, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.036>.
- Markovic I. (2006)**, High-Performance Hybrid-Fibre Concrete: Development and Utilisation (PhD Thesis). Delft (The Netherlands ): Technical University of Delft.
- Oh B. H. (1992)**, Flexural analysis of reinforced concrete beams containing steel fibers. Journal of Structural Engineering, 118(10), 2821-2836, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1992\)118:10\(2821\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:10(2821)).
- Oh B. H. (1994)** Closure of "Flexural analysis of reinforced concrete beams containing steel fibers". Journal of Structural Engineering, 120(6), 1934, doi: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:6\(1934\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:6(1934)).



- Reda M. M., Shrive N. G., Gillott J. E. (1999)**, Microstructural investigation of innovative UHPC. *Cement and Concrete Research*, 29(3): 323-329, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00225-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00225-7).
- Resplendino J. (2004)**, First recommendations for ultra-high-performance concretes and examples of application. En *International Symposium on Ultra High Performance Concrete* (pp.79-90). Kessel (Germany). Septiembre
- Richard P., Cheyrezy M. (1995)**, Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1501-1511, doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00144-2](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(95)00144-2).
- Tue N.V., Küchler M., Schenck G., Jürgen R. (2004)**, Application of UHPC filled tubes in buildings and bridges. En *International Symposium on Ultra High Performance Concrete* (pp. 807-817). Kessel (Germany). Septiembre
- Van Tittleboom K., De Belie N., De Muynck W., Verstraete W. (2010)**, Use of bacteria to repair cracks in concrete. *Cement and Concrete Research*, 40(1), 157-166, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.08.025>.
- Wang C., Yang C., Liu F., Wan C., Pu X. (2012)**, Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 538-544, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005>.
- Wu M., Johannesson B., Geiker M. (2012)**, A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 28(1), 571-583, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086>.
- Yang H., Joh C., Kim B-S. (2010)**, Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. *Engineering Structures*, 32(11), 3478-3487, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.07.017>.

