

COMPORTAMIENTO A FLEXION DE COMPUESTOS CEMENTICIOS DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO REFORZADOS CON FIBRAS DE VIDRIO ALCALINO-RESISTENTES

BENDING BEHAVIOR OF COMPOSITE CEMENT OF ULTRA HIGH PERFORMANCE GLASS FIBER REINFORCED ALKALI-RESISTANT

Christian Camilo Zambrano Pérez¹ Jairo Hincapie Luna² Jesús Orlando Castaño Tavares³

¹ Ingeniero Civil Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: zambrano.christian@javeriana.edu.co

² Ingeniero Civil Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: j.hincapie@javeriana.edu.co

³ Ingeniero Civil Universidad del Quindío. maestría en ingeniería del hormigón Politécnico de Valencia. Bogotá, Colombia. Correo electrónico: j.castano@javeriana.edu.co

RESUMEN

El concreto muestra muy buen comportamiento a compresión, pero ofrece escasa resistencia a la tracción, lo que resulta inadecuado para elementos que trabajen a flexión o tracción. Esta característica ha conducido a numerosas investigaciones y desarrollos para mejorar las resistencias ante estos esfuerzos, intentando lograr dentro del mundo de los materiales compuestos la solución a esta necesidad. El presente trabajo hace énfasis en la influencia del contenido de fibras de vidrio en concretos de ultra alto desempeño, evaluando su resistencia tanto a compresión como a flexión empleando materiales locales en su elaboración y de esta forma aplicarlo en obras de ingeniería civil; se realizaron comparaciones de los resultados con especímenes sin fibra de vidrio (control), para determinar la variación que sufren las mezclas. En esta investigación se realizaron 3 tipos de mezcla variando el contenido de arena para obtener un compuesto de ultra alto desempeño y de esta forma determinar la mejor resistencia posible a compresión (mayor de 110 MPa); además se implementaron las fibras de vidrio, analizando la influencia de la esbeltez y contenido de estas, obteniendo mejores resultados en cuanto al módulo de rotura de flexión del material resultante, el cual fue superior a 8 MPa.

Palabras clave: Concreto reforzado, fibra de vidrio, alcalino-resistente, ultra alto desempeño.

SUMMARY

The concrete shows very good compressive behavior, but offers little tensile strength, which is unsuitable for bending elements. This feature has led to extensive research and de-

velopment to improve the resistance to these efforts, trying to achieve in the world of composites solution to this need. This work emphasizes the degree influence the content of glass fibers in ultra-high

performance concrete, evaluating their resistance to both compression and bending using local materials in its production and thus apply in civil engineering; Comparisons of the results were made with specimens without glass fiber (control), to determine their variations mixtures. In this investigation, three types of content varying mixture of sand to obtain a compound of ultra-high performance and thereby determine the best compressive strength (greater than 110 MPa) were performed; glass fibers also have been implemented, by analyzing the influence of slenderness and content of these, obtaining better results in terms of modulus of rupture in bending of the resultant material, which was higher than 8 MPa.

Key words: Reinforced concrete, glass fiber, alkali resistant, ultra high performance.

INTRODUCCIÓN

La construcción es considerada uno de los sectores que generan mayor consumo de materiales, recursos naturales y consumo energético, siendo un sector profundamente impactante sobre el medio económico, medio ambiente y social. Por ello es necesario avanzar hacia un modelo de construcción sostenible, donde se optimice la energía, se reduzca la presión sobre los recursos naturales y a la vez se disminuya la generación de residuos en los procesos de construcción y demolición. Esto se consigue mejorando procesos y crean-

do materiales alternativos, eficientes y con iguales o mejores propiedades a las de los materiales existentes (Shackelford 2001).

Algunos trabajos e investigaciones se pusieron en marcha con el fin de generar un nuevo compuesto con diferente tipo de fibras que permitiera mejor manejabilidad y de esta forma obtener ventajas constructivas (Abdalla 2002) (Mohamed *et al.* 2011); el Dr. A. J. Majundar (1967), del Building Research Establishment empezó a investigar los vidrios que contenían circonio, logrando convertir en fibra alguno de ellos y demostrando la resistencia que presentaban estas fibras ante el ataque alcalino en un medio agresivo como el que suponía el contacto con el cemento. Tras continuas investigaciones, el refuerzo para los cementos se logró y la patente de esta investigación fue solicitada por el National Research Development Corporation (NRDC). A partir de ese momento, el interés por este compuesto se despertó y se han realizado diferentes tipos de investigaciones para mejorar su comportamiento a diferentes esfuerzos y en diferentes circunstancias, por eso la importancia de seguir indagando e innovando con este compuesto.

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibra de vidrio no solo dependen de las propiedades de la fibra o de su contenido en la matriz (Mohamed *et al.* 2011); la longitud de esta afecta su desempeño y puede traer otros efectos mecánicos como mayor resistencia y tenacidad. Hay efectos sinérgicos en el sistema ya que la fibra transmite esfuerzos de tracción y trabaja en conjunto con los agregados de la matriz, es así como una longitud muy corta no transmite los esfuerzos adecuadamente y el desempeño de la matriz no sería el adecuado, en este orden de ideas una longitud larga obstruiría la transmisión de esfuerzos entre los agregados y el desempeño de la matriz tampoco sería el apropiado (Metwally 2009).

Una línea de investigación para el desarrollo de nuevos materiales compuestos en la construcción se desarrolló bajo el titulado "Physical and mechanical performance of an innovative glass fiber reinforced plastic rod for concrete and grouted anchorages" (Chaallal *et al.* 1993). La fibra de vidrio Alcalino Resistente fue desarrollada especialmente para reforzar el cemento, dado que su alto contenido de óxido de circonio (mayor al 16%) ofrece una resistencia excelente para los compuestos alcalinos que componen el cemento y que reaccionan negativamente con el sílice del vidrio y aunque se ha demostrado que el refuerzo de cemento con filamentos de vidrio Alcalino Resistente produce mejoras en los módulos de ruptura y buena durabilidad, su aplicaciones principales se ha orientado a la sustitución de asbesto en Tejados y coberturas, paneles de revestimiento y componentes ornamentarias de construcción (Abdalla 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales locales para producir compuestos cementicios de ultra alto Desempeño.

Para la realización de los compuestos cementicios de alto desempeño se empleó arena proveniente de Zipaquirá; El humo de sílice empleado es proveniente de ferro-atlántico, este humo previamente pasó por un proceso de densificación para facilitar su transporte. El aditivo que se utilizó fue Pozzolith 460N, proporcionado por la Pontificia Universidad Javeriana, este aditivo es un hiperplastificante reductor de agua de alto rango basado en éterespoli-carbolicos modificados. El cemento empleado fue suministrado por Cemex y finalmente las fibras de vidrio fueron proporcionadas por Sumiglass cuya sede principal está ubicada en la ciudad de Medellín.

Influencia de la esbeltez de las fibras de vidrio sobre el comportamiento esfuerzo-deformación del compuesto cementicio de ultra alto desempeño

Se realizó una evaluación a flexión de 4 Compuestos reforzados con fibra de vidrio de una longitud 12 mm y 36 mm en proporciones de 2% y 3%; Los ensayos se realizaron empleando la norma ASTM C947 (ASTM 2009), la cual está diseñada para verificar las propiedades de flexión determinado por este método de ensayo, además son útiles para el control de calidad de la

fibra de vidrio reforzada en productos de concreto, dando cumplimiento a las especificaciones de gobierno, la investigación y el desarrollo y así mismo para la generación de datos para su uso en el diseño de productos. Con este método de ensayo se pretende determinar la resistencia final a la flexión y la fluencia del concreto reforzado con fibra de vidrio mediante el uso de una viga simple de 25,4 mm o menos de profundidad, usando como punto de carga el tercio de la probeta.

Afectación sobre el desempeño a flexión de los compuestos cementicios (módulo de rotura) que genera la variación de cuantía de refuerzo de fibra de vidrio y los cambios de esbeltez de estas.

Se realizó una evaluación del desempeño a flexión de 5 compuestos reforzados con fibras de diferente longitud, variando el contenido de las fibras en las siguientes proporciones:

- 12mm (80%), 36mm (20%)
- 12mm (60%), 36mm (40%)
- 12 mm (50%), 36mm (50%)
- 12mm (40%), 36mm (60%)
- 12mm (20%), 36mm (80%)

Los ensayos se realizaron empleando la norma ASTM C947 (ASTM 2009); la cual está diseñada para verificar las propiedades de flexión determinado por este método de ensayo, tal cual como se realizó para desarrollar el ítem anterior.

RESULTADOS Y DISCUSION

El presente proyecto aborda el estudio del concreto de ultra-alta resistencia y prestaciones (UHPC o ultra-high performance concrete), el cual ofrece una gran variedad de interesantes aplicaciones, como la construcción de variadas obras civiles, debido a que se pueden llevar a cabo diseños delgados, que a la vez son muy resistentes y van a tener gran durabilidad, ya que está basado en el principio de minimizar defectos como las micro fisuras y los vacíos, para lograr un mayor porcentaje de la carga ultima potencial e incrementar sustancialmente la durabilidad (González *et. al.* 2014).

Además de sus propiedades mecánicas mejoradas (resistencia a compresión comparada con mezclas convencionales), tiene una excelente resistencia a la corrosión (propiedad inherente de la fibra de vidrio), pudiendo acercarnos un poco más a las tan deseadas construcciones sin mantenimiento. Al ser necesaria la optimización de la masa granular para así obtener una matriz que permita una alta resistencia a la compresión, los materiales empleados en la elaboración del mismo se han escogido basados en la resistencia mecánica y la calidad, con los resultados de las pruebas realizados en el laboratorio.

Caracterización de los materiales

Las propiedades de los materiales utilizados como la distribución granulométrica, la gravedad específica y la absorción de agregados finos, fueron halladas de manera experimental y como lo indica la norma I.N.V. E- 222-07 (Instituto Nacional de Vías 2007). Se determinó la densidad del cemento y del humo de sílice, presentes en la tabla 4, se obtuvieron gracias al ensayo especificado en la norma I.N.V. E-307-07 (Instituto Nacional de Vías 2007), por medio del frasco de LE CHATELIER de acuerdo con el procedimiento en ella descrito.

La gravedad específica y absorción de la arena fue determinada también siguiendo los pasos establecidos en la norma I.N.V. E- 222-07 (Instituto Nacional de Vías 2007).

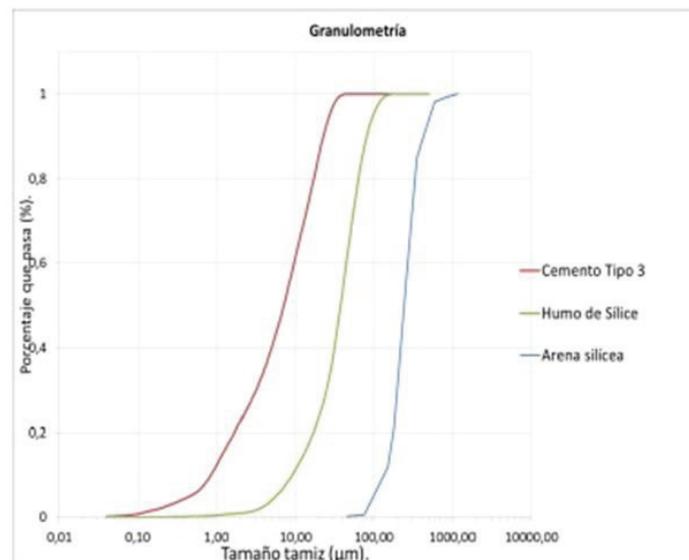
Tabla 1. Densidad de los materiales

Material	Densidad (g/cm ³)
Cemento	3.17
Humo de Silice	2.65
Arena Silícea	2.53

Fuente: presentación propia de los autores.

Se realizó las granulometrías del cemento Portland, del humo de sílice y de la arena silícea de Cundinamarca, para su realización se retienen porcentajes del material a evaluar a través de una granulometría laser, con lo cual se crea la curva granulométrica que permite visualizar la tendencia homogénea o heterogénea de las partículas (Diámetros).

Figura 1. Granulometría de los materiales



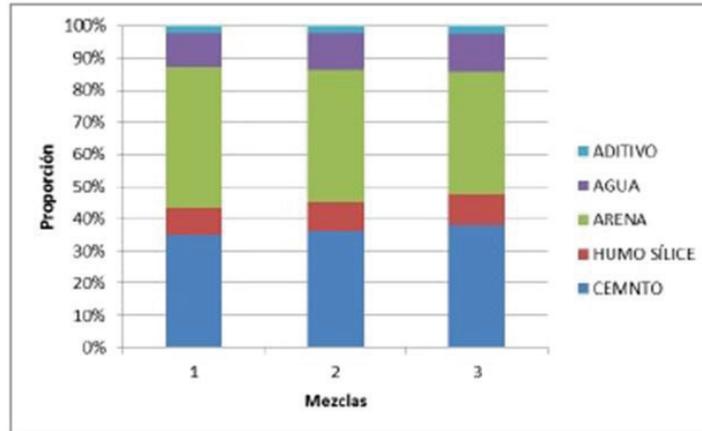
Fuente: presentación propia de los autores.

Las distribuciones granulométricas observadas en la Figura 1, muestran que el cemento es el componente más fino y representa un peso equivalente al de la arena, seguido del humo de sílice. Por lo tanto el cemento es el componente que tiene un diámetro lo suficientemente pequeño como para llenar los vacíos generados entre la arena y el humo de sílice.

Mezclas de prueba

Se desarrollaron 3 mezclas de prueba para determinar cuál de estas era la más resistente (en términos de compresión) y así utilizarla para desarrollar los concretos de ultra alto desempeño con fibras de vidrio y posteriormente realizar su análisis en pruebas de resistencias mecánicas (compresión y flexión).

Figura 2. Dosificación de las mezclas



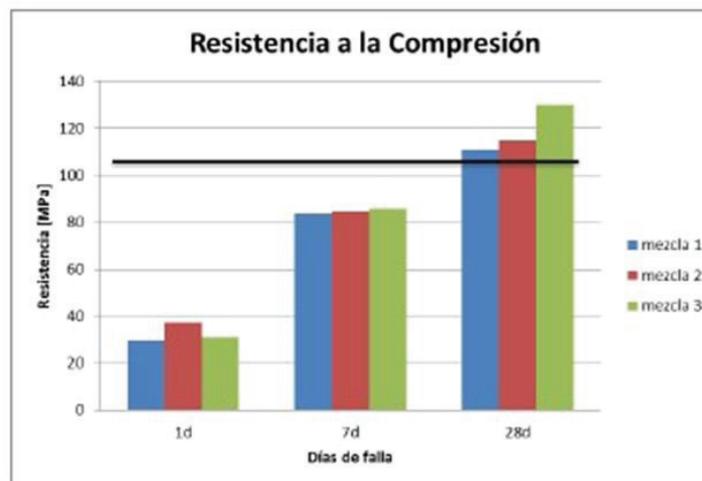
Fuente: presentación propia de los autores.

Como se puede observar la única variación que se realizó fue en el contenido de arena silíceo fina (en términos de peso), esto conlleva a una variación de todos los porcentajes de materiales en las dosificaciones; estas dosificaciones se realizaron a partir de una mezcla de ultra alto desempeño trabajada anteriormente (González *et. al.* 2014).

perior a los 110 MPa a compresión a los 28 días de curado, en este orden de ideas se aprecia que la mezcla numero 3 tiene un mejor desempeño a compresión a esta misma edad de curado y se observó una mejor fluidez al momento de llenar los moldes, por lo cual se optó utilizar esta mezcla para continuar con las siguientes etapas del proyecto, ya que esta presenta ventajas frente a las otras mezclas en este aspecto.

A partir de los datos obtenidos representados en la Figura 3, se registró que las mezclas presentaron una resistencia su-

Figura 3. Resistencia a la compresión mezclas de control



Fuente: presentación propia de los autores.

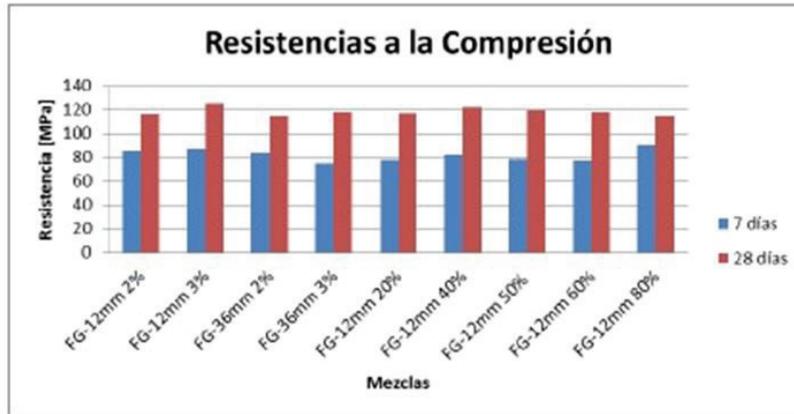
Mezclas con fibras

Compresión

Como se puede verificar las mezclas a los 7 días desarrollan una gran resistencia a la compresión (70% de su resistencia a los 28 días) en comparación a una mezcla normal de mor-

tero que esta alrededor de 17 MPa. Así mismo a los 28 días de curado las mezclas con fibras al igual que las mezclas de prueba, superaron los 110 MPa, sin embargo se redujo la resistencia en un 7% esto debido a la dificultad de compactación lo que conlleva a que las muestras presenten vacíos en su interior lo que conlleva a una reducción en la resistencia.

Figura 4. Resistencia a la compresión mezcla con fibras



Fuente: presentación propia de los autores.

Flexión

Con la intención de evaluar los módulos de rotura de probetas con diferente contenido de fibras de vidrio y siguiendo el ensayo a flexión descrito en la norma ASTM C947 (ASTM 2009) se realizó montaje de dicho ensayo, la cual se realizó en la Instron 3369, es de resaltar que esta herramienta nos ofrece la posibilidad de obtener el tiempo cada 0.1 segun-

dos, la carga aplicada [N], la flecha (deformación en el eje de la probeta [mm]), la deformación unitaria [mm/mm] y el esfuerzo a flexión [MPa] para el mismo instante de tiempo.

Para poder realizar una comparación de la influencia de las fibras de vidrio en la matriz cementicia se realizó el ensayo a flexión en una probeta sin contenido de fibras de vidrio.

Figura 5. Curva Esfuerzo vs Deformación

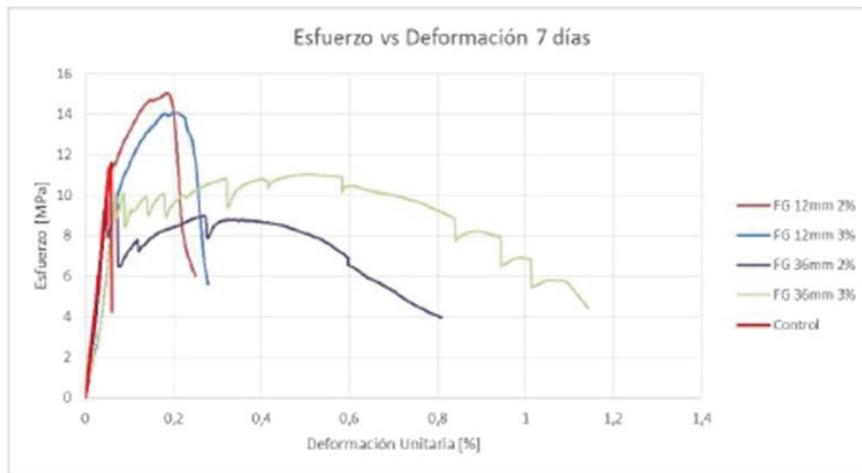


Fuente: presentación propia de los autores.

De la Figura 5 se obtuvo el módulo de elasticidad de la mezcla 3, el cual es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Representa la rigidez del material ante una

carga impuesta sobre el mismo. Así mismo se puede observar que el módulo de rotura de la mezcla no varía a distintas edades de curado, es decir que a los 7 días la mezcla alcanzó su resistencia máxima a flexión.

Figura 6. Curva Esfuerzo vs Deformación mezclas con fibras a 7 días.



Fuente: presentación propia de los autores.

En la Figura 6 se observan comportamientos variables según la fibra empleada en la probeta en las cuales se identifican dos comportamientos mecánicos diferentes tanto en esfuerzo como en deformación. Es así como la fibra FG-12mm permite alcanzar un esfuerzo último (módulo de rotura) aproximado al 20% mayor al esfuerzo último de la probeta de control (11.78MPa). En contra parte, la fibra FG-36mm

permite que la probeta pueda deformarse un 450% mayor a las deformaciones logradas por la probeta de control. Por esta razón se realizaron probetas combinando los tamaños de fibra empleadas de tal forma que permitiera lograr un mejor comportamiento en esfuerzo y en deformación. Los resultados se evidencian en la Figura 7.

Figura 7. Curva Esfuerzo vs Deformación fibras combinadas a 7 días.



Fuente: presentación propia de los autores.

Al combinar en variadas proporciones las fibras FG-12mm y FG-36mm se alcanzaron comportamientos mixtos, logrando mejores esfuerzos y deformaciones en comparación a la probeta de control, así mismo se presenta un esfuerzo de endurecimiento en el cual a pesar de salir de su rango elástico entra a una fase en la cual su capacidad de deformación es mayor incrementando su esfuerzo.

En la Figura 8 se puede observar los resultados obtenidos al realizar los ensayos a flexión en las probetas con un solo tamaño de fibra a los 28 días de edad. Se observa un comportamiento diferente al analizado en la Figura 6.

Figura 8. Curva Esfuerzo vs Deformación mezclas con fibras a 28 días

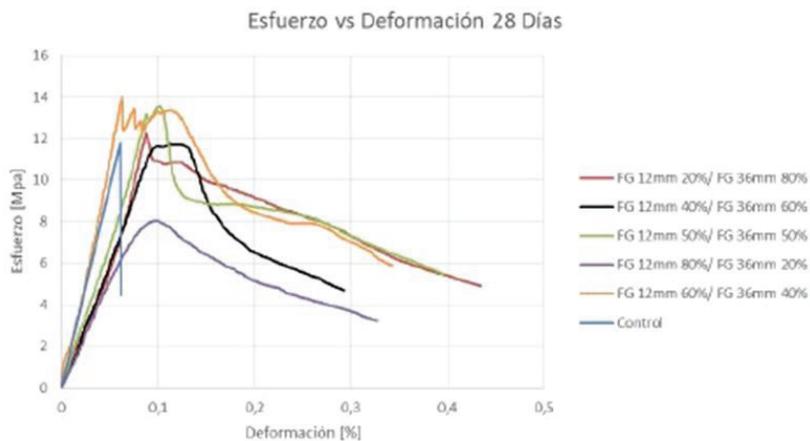


Fuente: presentación propia de los autores.

Se hace notorio que el comportamiento de las fibras en la matriz se mantiene logrando mejorar las características mecánicas relacionadas al esfuerzo y a la deformación de acuerdo al tamaño de fibra empleado, así mismo se observa una mejora del 13 % en el módulo de rotura en la matriz con inclusión de FG-12mm comparado con las mezclas falladas a los 7

días, lo que indica que las fibras influyen en este comportamiento ya que al compararlo con las mezclas sin inclusión de fibras se evidencia que estas no presentan una mejora en el módulo de rotura de 7 días a 28 días.

Figura 9. Curva Esfuerzo vs Deformación fibras combinadas a 7 días.



Fuente: presentación propia de los autores.

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos al fallar a los 28 días las probetas con inclusión de fibras combinadas, en la cual se observa un comportamiento distinto al comportamiento obtenido a los 7 días de falla, ya que no se presentó endurecimiento en las probetas, se considera que la relación matriz-fibra presenta una falencia en términos de adherencia, esto se detalló en el momento en que la probeta falla donde las fibras en la matriz no están fracturadas sino que por el contrario se presentan un deslizamiento. Así mismo solo se presentó una fisura en el centro de la luz, y no una multifisuración como se encontró en la literatura.

Polivinilo de Alcohol

Adicionalmente se realizaron ensayos a flexión con probetas que contenían fibra de polivinilo de alcohol (PVA) en un contenido de 2% y 3%, los resultados de estas muestras comparados con las probetas que contienen fibras de vidrio alcalino resistentes revelan que la adherencia matriz fibra es parte fundamental al momento en que la probeta es sometida a esfuerzos de flexión, así mismo la Figura 10 muestra que la probeta con PVA 20mm presenta una gran deformación, en comparación a la Figura 6 de las probetas que contienen fibra de vidrio; sin embargo ambas graficas muestran una gran mejora respecto a la muestra de control especialmente en deformación.

Figura 10. Curva Esfuerzo vs Deformación fibras Polivinilo de alcohol a 7 días.



Fuente: presentación propia de los autores.

Al momento de presentarse la falla en las probetas con PVA 20mm que se realizaron, se pudo observar que se forman entre 3 y 5 grietas a diferencia de la falla de las probetas con fibra de vidrio Alcalino Resistentes.

CONCLUSIONES

Se logró obtener a partir de materiales utilizados del ámbito local, mezclas cementicias de Ultra Alto Desempeño llegando a obtener resistencias de hasta 136 MPa con un promedio de las mezclas de 121 MPa, superando los 110 MPa que se tenían como objetivo establecido por la literatura.

Según los datos obtenidos, se determinó que las fibras generaron una disminución del 7% de la resistencia a la compresión en comparación a la presentada por los especímenes de control a los 28 días (136 MPa) debido a la dificultad de

compactar las mezclas generando vacíos y por ende reduciendo la resistencia de las muestras ante las cargas, lo que se ratifica en los estudios realizados por estudiantes en la Universidad de Chile y en la Pontificia Universidad Javeriana. Según los análisis realizados se obtuvieron comportamientos de endurecimiento post fisuras en las pruebas de flexión a 7 días con fibras de vidrio, lo cual lleva a un comportamiento de ductilidad en las muestras post-carga máxima aumentando la deformación en todos los casos.

La mezcla combinada del 50% de cada fibra presentó un comportamiento equilibrado en un análisis de esfuerzo vs deformación, es decir obtuvo un límite plástico de 10.65 MPa con un módulo de rotura de 15.40 MPa, lo que representa una deformación 25% mayor a los 7 días en comparación a la mezcla de control.

BIBLIOGRAFIA

En cuanto a los ensayos a 28 días obtuvo un límite plástico de 11.25 MPa con un módulo de rotura de 15.02 MPa, representando una deformación 13% mayor que la mezcla de control, manifestando la influencia de las fibras de vidrio en el desempeño a flexión del compuesto cementicio trabajado. Se encontró una deficiencia en la relación fibra de vidrio – matriz cementante en cuanto a la adherencia por lo cual se realizó un ensayo con fibras de Polivinilo de Alcohol para comparar los resultados observados, que de acuerdo a la literatura se produce una mejor interacción química entre esta última y los componentes de la mezcla. La deformación unitaria lograda en el ensayo obtuvo deformaciones hasta un 0.44%, es decir se alcanzó un 100% de mejora con respecto a las muestras con fibras de vidrio.

Se estableció mediante los ensayos a flexión que el tamaño de las fibras de vidrio tienen una afectación en el comportamiento mecánico de las muestras, de acuerdo a los resultados se determinó que la fibra FG-12mm permite alcanzar un esfuerzo último (módulo de rotura) de 20% por encima del esfuerzo último de la probeta de control (11.78MPa), en cambio la fibra FG-36mm beneficia la probeta en cuanto a deformación ya que aumenta en un 450% frente a la mezcla de control.

El límite de proporcionalidad se reduce en promedio un 13% en todas las mezclas con fibras de vidrio a los 7 días de edad frente a la mezcla control que presentó un límite de 11,71 MPa, por el contrario a los 28 días de falla se presentan mejoras en algunas probetas con promedio de 11,77 MPa (ver tabla 8) más sin embargo, la deformación unitaria se acrecentó en todos los casos desde un 10% en adelante. En cuanto a los módulos de rotura, se establece un aumento en la gran mayoría de las mezclas con fibras de vidrio junto a una deformación apreciable (20% en adelante), este aumento es del orden del 25% y del 70% de los 7 a los 28 días respectivamente, demostrando el mejoramiento mecánico proporcionado por las fibras en las mezclas trabajadas a flexión. Se observa que la combinación de fibras mejora los dos ítems trabajados en los ensayos a flexión, estos son tanto el esfuerzo gracias a las fibras cortas (FG-12mm) como la deformación por las fibras largas (FG-36mm), lo que mejora cuantitativamente el comportamiento de las mezclas para su aplicabilidad en algunos componentes estructurales.

1. Abdalla. Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Composite Structures*, volume 56 (1), 2002.
2. ASTM International, ASTM C947-03(2009), Standard Test Method for Flexural Properties of Thin-Section Glass-Fiber-Reinforced Concrete (Using Simple Beam With Third-Point Loading), 2009.
3. Chaallal, Benmorkrane. Physical and mechanical performance of an innovative glass fiber reinforced plastic rod for concrete and grouted anchorages, *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 20 (2), 1993.
4. González, Castaño, Alvarado, Gasch. Influencia del volumen de fibras y curado posterior sobre el comportamiento post-fisura de un concreto de ultra-alto desempeño. *Revista ingeniería de construcción*, volumen 29 (3), 2014.
5. Instituto Nacional de Vías, Norma Para Determinación de gravedad específica y absorción de agregados finos, I.N.V. E-222-07, 2007.
6. Instituto Nacional de Vías, Norma Para Determinación de Densidad del Cemento Hidráulico, I.N.V. E-307-07, 2007
7. Metwally. Evaluation of Existing Model for Predicting of Flexural Behavior of GFRP- Reinforced Concrete Members, *HBRC Journal*, volume 5 (1), 2009.
8. Mohamed, Metwally, Sherif. Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars, *Engineering Structures*, volume 33, 2011.
9. Shackelford. *Introducción a la Ciencia de los Materiales para Ingenieros*. 6ta. Edición, Pearson, 2001.