

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



PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR:

IC, MSC. JESUS ORLANDO CASTAÑO

PRESENTADO POR:

JAIRO HINCAPIE LUNA

CHRISTIAN CAMILO ZAMBRANO PEREZ

BOGOTÁ D.C

2014

# 1 TABLA DE CONTENIDO

1	TABLA DE CONTENIDO .....	2
2	<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	5
3	<b>DEDICATORIAS</b> .....	5
4	<b>RESUMEN</b> .....	6
5	<b>ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN</b> .....	9
6	<b>OBJETIVOS DEL PROYECTO</b> .....	12
	6.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
	6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
7	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	13
	7.1 Antecedentes a los compuestos cementicios modernos .....	13
	7.1.1 Inicios de los compuestos cementicios .....	13
	7.1.2 Concreto de Ultra Alta Resistencia (UHPC) .....	14
	7.1.3 Concreto de Ultra Alto Desempeño reforzado con fibras.....	19
	7.1.4 Compuesto cementicio prediseñado (ECC) .....	26
	7.2 La fibra de vidrio Alcalino-Resistente (AR): .....	28
	7.3 Compuestos Cementicios reforzados con fibra de vidrio.....	32
8	<b>METODOLOGÍA</b> .....	43
	8.1 Emplear materiales locales para producir compuestos cementicios de ultra alto desempeño .....	43

8.2	Evaluar la influencia de la esbeltez de las fibras de vidrio sobre el comportamiento esfuerzo -deformación del compuesto cementicio de ultra alto desempeño .....	44
8.3	Analizar la 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.....	45
<b>9</b>	<b>RESULTADOS ESPERADOS .....</b>	<b>46</b>
<b>10</b>	<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>46</b>
10.1	Caracterización de los materiales .....	47
10.2	Mezclas de prueba .....	50
10.3	Mezcla con fibras.....	57
10.3.1	Compresión .....	57
10.3.2	Flexión .....	59
10.4	Polivinilo de alcohol.....	74
<b>11</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>78</b>
<b>12</b>	<b>RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>81</b>
<b>13</b>	<b>TRAYECTORIA DE LOS INVESTIGADORES .....</b>	<b>82</b>
<b>14</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>84</b>

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Ing. María Patricia León

Director de Carrera

Ingeniería Civil – Pontificia Universidad Javeriana

---

Ing. Jesús Orlando Castaño Tabares

Director del Trabajo de Grado

Bogotá, junio de 2014

## **2 AGRADECIMIENTOS**

Queremos agradecer a Dios por permitirnos estudiar en esta prestigiosa universidad y así mismo permitirnos realizar este trabajo en el tiempo correspondiente, a nuestros padres y hermanos por el constante apoyo y fortaleza que nos brindaron en todo este tiempo de vida universitaria. Agradecer al laboratorio de ingeniería civil que nos colaboró en cada etapa y permitió el desarrollo de este proyecto. A nuestro director de trabajo de grado por su ayuda y direccionamiento en el correcto camino para el desarrollo de tal. A nuestros amigos que han estado apoyándonos desde siempre y que se han convertido en nuestra segunda familia.

## **3 DEDICATORIAS**

Para mamá y papá que siempre han estado presentes en mi vida y gracias a ustedes hoy soy todo lo que soy, sin ustedes nada de esto sería posible y que hoy ya es una realidad. A mis amigos que son mi segunda familia y han trascendido en mi vida.

*Jairo Hincapie Luna*

Para mis padres y familiares quienes me han apoyado a lo largo de mi vida universitaria siendo un soporte en aquellos momentos de flaqueza, a mis compañeros y amigos quienes me han brindado su amistad y tiempo para desarrollarme como Javeriano. *Christian Camilo Zambrano Pérez*

## 4 RESUMEN

El concreto muestra muy buen comportamiento ante la compresión, pero ofrece muy escasa resistencia a la tracción, por lo que resulta inadecuado para elementos que tengan que trabajar 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 de grado 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; así mismo 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 en las cuales se modificó su 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 CLAVES**

Concreto reforzado con fibra de vidrio, Fibra de vidrio alcalino resistente, Concreto de ultra alto desempeño.

## **ABSTRACT**

The concrete shows very good compression performance, but offers very little tensile strength, making it suitable for items that have to work bending or pulling. This feature has led to extensive research and development to improve the resistance to these efforts, trying to achieve in the world of composites solution to this need.

The present work does emphasis in the influence of the content of glass fiber in ultra-high performance concrete, evaluating their compression resistance and flexion resistance using local materials in its production and thus apply in civil engineering works. Comparisons of the results were carried out with control specimens without glass fiber to determine the variation that the mixtures.

In this research, three types of mixture were made to obtain ultra-high performance composite and to determine the best possible compression resistance (greater than 110 MPa) , also to implementing the glass fibers and in this way for outstanding results in terms of modulus flexural rupture of the resulting material, it means, higher than 8MPa.

## **KEYWORDS**

Glass fiber reinforced concrete, alkali resistant glass fiber, ultra high performance concrete.



## 5 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

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

Actualmente la combinación de diferentes materiales, mediante el desarrollo de materiales compuestos, permite producir nuevos materiales que conservan una proporción significativa de las propiedades de los materiales constituyentes, pero que permiten obtener propiedades que no tiene ninguno de sus componentes posee por si solo (Callister W., 1997).

Algunos trabajos e investigaciones se pusieron en marcha, un ejemplo de esto son los trabajos desarrollados por Abdalla (2002) y el grupo de investigación liderado por Issa (2011) , con el fin de generar un nuevo compuesto con diferente tipo de fibras que permitiera mejor manejabilidad y de esta forma obtener ventajas constructivas; en 1967 el Dr. A. J. Majundar, del Building Research Establishment empezó a investigar los vidrios que contenían zirconio, 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.

La fibra de vidrio es un material compuesto, consistente en fibras continuas o discontinuas de vidrio embebidas en una matriz polimérica. La elevada integridad de este producto la hace adecuada para su uso en una gran variedad de procesos, entre ellos el refuerzo de matrices con base cemento, pues se dispersan con mucha facilidad y de manera homogénea, incluso en dosis elevadas, no se aglomeran, no flotan y no se hunden porque tienen la misma densidad que el concreto.

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( Issa, 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 trasmite esfuerzos de tracción y trabaja en conjunto con los agregados de la matriz, es así como una longitud muy corta no trasmite 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 I., 2008).

Una línea de investigación para el desarrollo de nuevos materiales compuestos en la construcción se desarrolló por Omar Chaallal (1993) en su trabajo titulado "*Physical and mechanical performance of an innovative glass fiber reinforced plastic rod for concrete and grouted anchorages*". La fibra de vidrio Alcalino Resistente fue desarrollada especialmente para reforzar el cemento, dado que su alto contenido de óxido de zirconio (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 ornamentarías de construcción (Abdalla H., 2002.).

La justificación del presente trabajo de grado está basada en la innovación de un compuesto cementicio de alta resistencia a la compresión al cual se le optimizará su desempeño a flexión a través del refuerzo con fibras de vidrio variando el contenido de esta, así mismo se justifica en el aporte al conocimiento de los concretos de ultra-alto desempeño en Colombia, utilizando materiales locales que permitan suplir los requerimientos de este tipo de compuestos; cabe resaltar que estas mezclas son usadas principalmente en fachadas, recubrimientos, pisos y elementos no estructurales.

## **6 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **6.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la influencia del contenido y esbeltez de las fibras sobre el desempeño a flexión de un compuesto cementicio de ultra alto desempeño ( $f'c > 110$  MPa) reforzado con fibras de vidrio.

### **6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Emplear materiales locales para producir compuestos cementicios de ultra alto desempeño.
- Evaluar la influencia de la esbeltez de las fibras de vidrio sobre el comportamiento esfuerzo -deformación de compuestos cementicios de ultra alto desempeño.
- Analizar la afectación sobre el desempeño a flexión de los compuestos cementicios (módulo de rotura) que genera la variación de esbeltez y cuantía de refuerzo de fibra de vidrio.

## **7 MARCO TEÓRICO**

### **7.1 Antecedentes a los compuestos cementicios modernos**

#### **7.1.1 Inicios de los compuestos cementicios**

El primer registro del compuesto cementicio, se remonta al pueblo egipcio hace unos 5000 años, que utilizaba el yeso para hacer piezas decorativas e incluso como mortero y como revestimiento de paredes, a pesar que este presentaba una resistencia física baja. Posteriormente en la Antigua Grecia, hacia el 500 a.C, se empezaron a mezclar compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo materiales como piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, dando origen al primer concreto de la historia. Al buscar mejores resultados en este aspecto, el hombre utilizó compuestos para mejorar dicha materia como son la cal (óxido de calcio) y las arcillas puzolánicas.

A partir de ahí se realizaron avances en el uso de materiales cementantes hasta llegar a los concretos convencionales como se conocen hoy en día, es decir aquellos que están formados por una mezcla homogénea y proporcional de agregado fino, agregado grueso, cemento y agua, siendo estos dos últimos los que reaccionan químicamente para unir los agregados formando una masa sólida, siendo usada para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y para revocar las paredes (Tejero E., 1987).

En la actualidad se están empleando ingredientes reciclados como son el humo de sílice, la cascarilla de arroz o las cenizas volantes, este último un subproducto de las centrales termoeléctricas alimentadas por carbón, lo que permite reducir en gran medida el volumen de cemento utilizado en la fabricación del concreto convencional, reduciendo costos de fabricación y beneficiando al medio ambiente de por medio ya que la producción de cemento genera grandes volúmenes de dióxido de carbono el cual se retiene en la atmosfera afectando la salud humana (Heyman J., 2001).

### **7.1.2 Concreto de Ultra Alta Resistencia (UHPC)**

El concreto de ultra alta resistencia o UHPC por sus siglas en inglés, es resultado de investigaciones en las décadas de los 80 y 90 destinadas a incrementar las resistencias mecánicas del concreto y se define como el que vincula combinaciones especiales de comportamiento y uniformidad usando ingredientes convencionales y practicas normales para el mezclado (Durán, et al. 2005). Se caracteriza por ser un material compuesto que logra resistencias a la compresión entre 110 MPa y 250 MPa como lo establece la Association Francaise de Genie Civil (2002). Sus principales materiales constituyentes son: Arena típica de grano fino, humo de sílice u otros aditivos y mezclas especiales de alta resistencia de cemento Portland.

Gracias al uso de diversos aditivos se logra reducir el volumen de cemento a emplear sin reducir los rangos de los concretos de ultra alta resistencia que varían entre 120 a 200 MPa (Sujivorakul, et al. 2011); además de aportar múltiples mejoras en diversas propiedades del compuesto. Esta resistencia mecánica se diversifico mediante ajustes detallados en las proporciones de los agregados en el compuesto

cementicio, obteniendo un rango variable en algunas propiedades como son las mezcla con altas resistencias en edades tempranas, uso de diferentes tipos de agregados, aditivos y métodos especiales de curado.

Al tener en consideración las investigaciones que se han desarrollado a lo largo del siglo pasado, la definición de la resistencia mecánica ha variado con el tiempo, es así que los límites establecidos se ajustan a los valores que propuso Cook (1989) y por el Instituto de Concreto Americano (ACI), cuyo comité 363 , estableció una serie de rangos de mezclas de alto y ultra alto desempeño de acuerdo a la región geográfica donde se producen comercialmente, estableciendo para el ámbito local colombiano los límites de la tabla 1 (Russell H., Moreno J., 1997).

Definiciones de mezcla	Resistencia 28 días	
	Psi	MPa
Mezcla De Alta Resistencia	5,160	35,6
	7,360	50,8
	8,580	59,2
	9,290	64,1
	12,120	83,6
Mezcla de Ultra Alta Resistencia	16,000	110,5

Tabla 1, Clasificación de mezclas de acuerdo a su resistencia a compresión.

Para obtener una mezcla de ultra alto desempeño se deben tener en cuenta que estas poseen una relación de agua-material cementante inferior a 0.25 por lo cual se obtiene un material muy denso reduciendo su fluidez (Garín, et al. 2012), además se debe incluir un curado adecuado con el fin de controlar los cambios de

temperatura y humedad adentro y fuera de la mezcla, que se generan por la reacción química entre los compuestos, tal como se establece en la investigación realizada por Fernández (2009).

Es considerado por varios autores, que estas mezclas deben tener una alta concentración de material cementante, recomendando que se utilicen contenidos superiores a los 900 kg, con una composición entre un 20% y 25% de humo de sílice o demás aditivos que garanticen las altas resistencias (Wang, et al. 2012). Asimismo estos autores establecen que es obligatorio el uso de altas dosis de súper-plastificantes, que permiten reducir representativamente la relación agua-cemento, considerando que al existir menor volumen de agua en relación al cemento, mayor será la resistencia alcanzada en términos de compresión como se observa en la imagen 1, menor fluidez o manejabilidad y mayor durabilidad, ya que al poseer un menor volumen de agua se generará menor cantidad de poros y vasos capilares que se forman durante su evaporación, siendo estos poros los que permiten la penetración de los agentes agresivos cuando el concreto no está protegido de los factores climáticos, atacando las matriz del concreto.



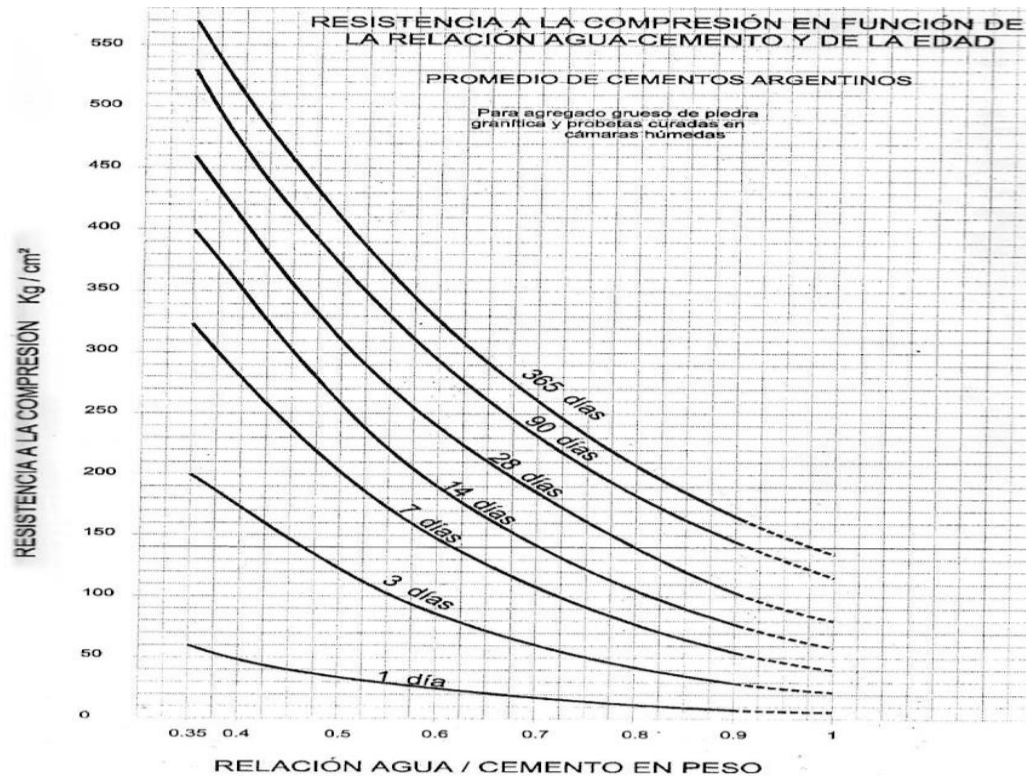


Imagen 1. Resistencia a la compresión de acuerdo a la relación A/C (Diaz F. A., 2012).

También en estudios realizados por Fehling (2004) se observó que la resistencia a la compresión de los concretos de ultra alto desempeño varía entre 150 a 220 MPa, y que hasta un 70 a 80% de la fuerza a compresión, se obtiene un comportamiento elástico lineal al incluir fibras además de evita una falla explosiva por la adherencia de estas a la matriz del concreto.

Es de resaltar que una de las características más representativas de los concretos tradicionales e incluso de los concretos de ultra alto desempeño, es la curva esfuerzo-deformación en los ensayos a flexión, donde se muestra un comportamiento tanto elástico-lineal como una falla imprevista o de rotura, algo que se pretende evitar en los materiales empleados en las obras de construcción civil.

Sin embargo la resistencia a la tensión presentada por el concreto de ultra desempeño está limitada a rangos aproximados de 7 MPa en vigas según ensayos, lo que genera que las mezclas puedan considerarse frágiles (Alderete N., 2010). Además Fehling (2004) también realizó este tipo de ensayos encontrando valores de resistencia de entre 7 y 10 MPa presentando falla frágil mientras que al incluir fibras se aumentó este intervalo de 7 y 15 MPa y la falla pasó a ser dúctil. La imagen 2 muestra los resultados típicos de los ensayos a flexión con inclusión de fibras.

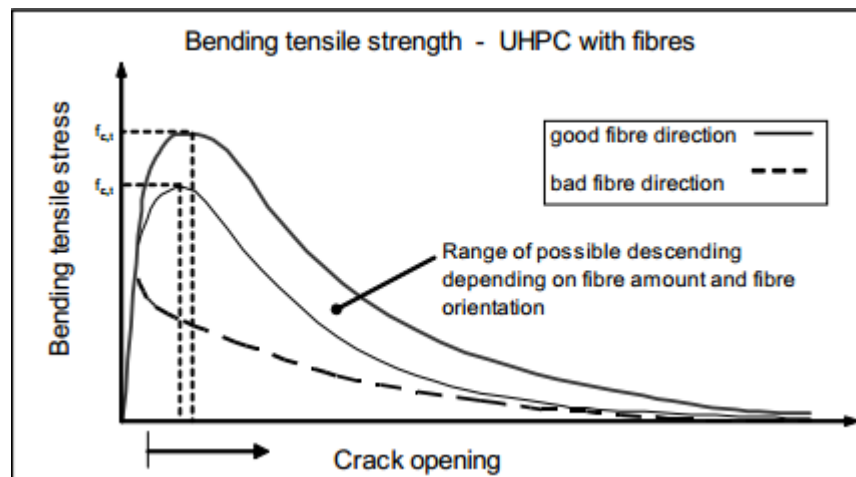


Imagen 2. Resultados típicos de ensayos a flexión (Fehling, et al. 2004)

### 7.1.3 Concreto de Ultra Alto Desempeño reforzado con fibras

En la década de 1960 y gracias a las investigaciones de Majundar et al. (1967) se utiliza el concreto reforzado con fibras, las cuales se incorporan en el momento del amasado, obteniendo una mejor isotropía y aumentando las resistencias mecánicas frente a la flexión, tracción, impacto, fisura, etc.

Pero solo desde principios de la década de los 90 hasta la actualidad el concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras, o UHPFRC por sus siglas en inglés, se ha venido empleando en distintas etapas de la construcción civil, ya que las fibras proporcionan mejoras en sus propiedades de tracción a través de la multifisuración del material, lo que incrementa la capacidad de alto cizallamiento en los miembros de flexión. De acuerdo a esto existen tres tipos de concretos de ultra alto reforzados con fibras:

**Tipo 1:** Tienen un contenido de fibras entre 5 y 10% por volumen, y las fibras no exceden 6 mm en longitud, estas mejoran la resistencia a la tracción, pero su contribución es muy poca en cuanto a ductilidad.

**Tipo 2:** Tienen un contenido intermedio de fibras largas, variando entre un 2 y 3% el volumen, y las fibras están entre 13 y 20 mm de largo. Estas fibras ayudan a mejorar la resistencia a la tensión y la ductilidad.

**Tipo 3:** Tiene un contenido muy alto de fibras de varias longitudes, llegando hasta 11% del volumen total, variando desde 1 hasta 20 mm de largo. La combinación de

las distintas fibras incrementan significativamente tanto la resistencia a la tensión como la ductilidad del concreto, llegando incluso a reemplazar algunas de las varillas de refuerzo tradicionales en un elemento (Manual Técnico Fibras, Maccaferri, 2013).

Es de resaltar que algunos de los materiales empleados para la fabricación de los cementos de ultra-altas resistencias incluye adiciones que reemplazan el contenido de cemento y que mejoran la resistencia como son: las cenizas volantes, el humo de sílice entre otros; así mismo incluye un aditivo hiperplastificante, cemento Portland y demás agregados que el diseñador de mezclas considere adecuado.

Una peculiaridad de la inclusión de las fibras es que la curva esfuerzo vs deformación permite caracterizar la resiliencia y la tenacidad del concreto, que son, respectivamente, la energía elástica y total absorbida, representadas por el área comprendida bajo la curva esfuerzo-deformación hasta el límite elástico en el primer caso y hasta la rotura en el segundo caso como se puede observar en la figura 1.

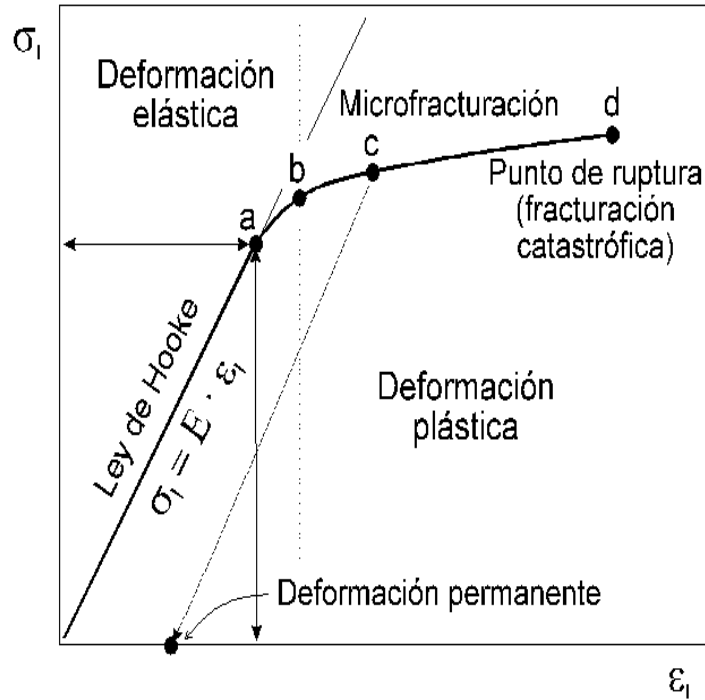


Figura 1. Curva esfuerzo vs deformación, con tramo elástico y plástico. (Agcasco, 2007)

Por esta razón es indispensable añadir una cantidad importante de fibras, con el fin de aumentar la tenacidad del concreto, consiguiendo así un comportamiento dúctil en el material. Las fibras añadidas en el proceso de mezcla del concreto, mejoran considerablemente las resistencias a impacto, fatiga y flexión, de tal manera que ofrece gran variedad de prestaciones por la superioridad técnica que presentan. El concreto de ultra-alto desempeño reforzado con fibras es un candidato viable para superar la baja resistencia a la tensión y la ausencia de ductilidad del mismo (Millon, et al. 2009).

Sin embargo hoy en día, aun no se puede considerar que exista una metodología simplificada para el diseño de mezclas de concretos de alta resistencia con inclusión de fibras pues es un tema relativamente nuevo que es aun objeto de ensayos e investigaciones, esto hace que sea un campo interesante de explorar, en busca de

relaciones que se puedan interpretar en pro de la utilización de estos materiales en la industria nacional y a nivel global.

Es de resaltar que las fibras ofrecen una combinación única de características que incluyen la ductilidad, resistencia y durabilidad. El uso de esta tecnología permite al diseñador crear secciones más delgadas y luces mayores siendo más ligeras, elegantes e innovadoras en geometría y forma, con mayor durabilidad e impermeabilidad frente a la corrosión, a la abrasión e impacto (Seibert & Perry, 2013)

Por tales motivos se han realizado investigaciones estudiando la afectación según el tipo de fibra. En una de estas investigaciones se comparó el desempeño de la fibra de vidrio con otros tipos de fibra como son las de polipropileno, encontrando que estas últimas no tienen influencia en el aumento a la resistencia a la flexo tracción, en contra parte presenta propiedades similares a las fibras de vidrio, sin embargo para obtener resultados similares a los obtenidos con la fibra de vidrio se encontró que la cantidad de fibra de polivinilo debe duplicarse. (Bravo J., 2003).

Investigadores como Redaa et al (1999) produjo concretos de ultra alto desempeño innovando una mezcla que contenía fibras de carbono que tenían mejor resistencia y tenacidad a la fractura de la matriz con una resistencia superior post fisura que el concreto convencional. Además demostró gracias a un examen de las micro fibras de carbono que estas al tener una superficie no lisa, favorecen un mejor agarre entre estas fibras y la matriz cementicia.

Este comportamiento de endurecimiento por deformación asociada post fisura en los ensayos de flexión con fibras también fue descrito Bayard (2003) quien asocio este comportamiento con el contenido de fibra, la geometría de la fibra (longitud, diámetro) y la orientación de la fibra.

Igualmente se pudo determinar experimentalmente que las resistencias de muestras con fibras de vidrio aumentan la flexo tracción mas no se tuvo efecto alguno en cuanto a mejorar la compresión, mientras las de acero dificultan su puesta en obra por los volúmenes y peso manejados (Muñoz F., 2011), sin embargo estas fibras de acero presentaron una resistencia a la flexión 68% mayor que la resistencia a la flexión de las muestras que no contenía fibras (Allena & Newton, 2010).

Una característica importante de las fibras utilizadas como refuerzo, es la trabazón y la adherencia con la matriz cementicia. La adherencia está relacionada con la afinidad química de la superficie de la fibra con la propia matriz y la trabazón con la rugosidad de su superficie, esta interface existente puede ser el factor principal que controla la adherencia fibra-matriz, sin embargo muchos estudios que han sido conducidos con el objetivo de derivar las propiedades estructurales de la relación entre la interface fibra-matriz en sistemas compuestos, han tenido poco éxito analítico (Lawerence T. 1999).

Uno de los estudios propuestos en cuanto a adherencia fibra-matriz es el de Sockalingam (2012) quien empleo el ensayo MicroBond, por el cual a través de un modelamiento numérico, para determinar la calidad de la adhesión presente entre la fibra de polímero y la matriz, sin embargo se generaron grandes cantidades de

dispersión en los datos experimentales atribuidos a factores como la relajación viscosa de matriz polimérica durante el procesamiento y el curado, la incapacidad para controlar de forma precisa la distancia de separación de la carga, la naturaleza de la carga y el estrés en el curado. Dado que la prueba MicroBond ha sido adoptada por muchos investigadores durante las últimas décadas para estudiar el comportamiento interface entre la fibra y la matriz y para estudiar los efectos de los tratamientos de superficie, se hace vital el desarrollar una metodología de ensayo normalizado para eliminar estas fuentes de dispersión de los datos para así poder producir resultados precisos.

A partir de esto es importante resaltar la relevancia que en las últimas décadas ha presentado la innovación de las Fibras de Polivinilo de Alcohol (PVA) descritas en el trabajo de investigación “*Super Ductile PVA-Fiber Reinforced Cement Board*” (Hoshiro. et al, 2008), donde se comprende mejor el comportamiento de los compuestos embebidos con este tipo de fibras, es decir que se presentan unas resistencias semejantes a flexión en comparación a ensayos con fibras de vidrio, sin embargo al momento de determinar las deformaciones se obtiene un aumento significativo al usar estas fibras, gracias a las propiedades del material y a la relación fibra-matriz cementante que presentan una mejor adherencia entre sí con una dispersión más homogénea en la matriz (Bezerra E. M., 2004).

La propia naturaleza de las fibras de Polivinilo de alcohol aporta mayor adherencia con las matrices cementicias en comparación a otras fibras, acorde a los estudios realizados por (Rendón Et al, 2001), en sus estudios sobre la interface de fibra PVA



y matriz cementicia. De acuerdo con Wang (2003), esta adhesión se debe a que las fibras generan un fuerte enlace químico con los hidratos del cemento.

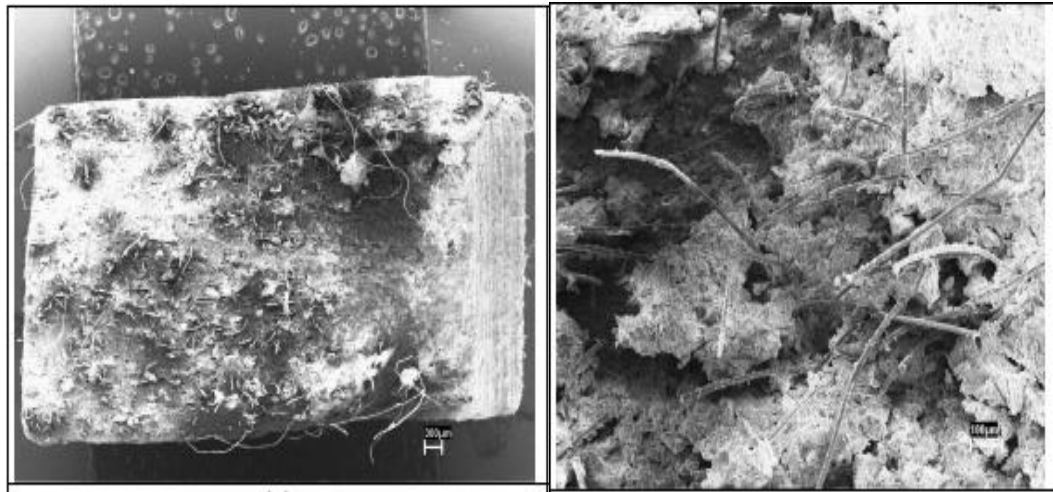


Imagen 3. Dispersión homogénea de las fibras de polivinilo y adherencia a la matriz de cemento (Bezerra E. M., 2004).

En la tabla 2 se presenta la clasificación de las actuales fibras que se encuentran disponibles en el mercado, aclarando que existen diferentes tipos de fibras para el concreto en función de la materia prima por la cual ellas están producidas como son:

- Fibras metálicas: aceros de carbono y aleados de aluminios.
- Fibras naturales: amianto (asbesto), celulosa, carbón.
- Fibras sintéticas: nylon, polipropileno, poliacrilo nitrilo, polivinilo de alcohol.

Fibras	Diámetro (μm)	Densidad (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> )	Modulo elástico (kN/mn <sup>2</sup> )	Resistencia a tracción (kN/mn <sup>2</sup> )	Elongación a ruptura (%)
Acero	5 - 500	7,84	200	0,5 - 2	0,5 - 3,5
Vidrio	9 - 15	2,60	70 - 80	2-4	2 - 3,5
Amianto	0,02 - 0,04	3,00	180	3,30	2 - 3
Polipropileno	20 - 200	0,90	5 - 7	0,5 - 0,75	8
Nylon	-	1,10	4	0,90	13 - 15
Poliétileno	-	0,95	0,30	0,0007	10
Carbono	9	1,90	230	2,60	1
Kevlar	10	1,45	65 - 133	3,60	2,1 - 4
Acrílico	18	1,18	14 - 19,5	0,4 - 1	3

Tabla 2. Características Mecánicas de las fibras (Manual Técnico Fibras, Maccaferri, 2013)

### 7.1.4 Compuesto cementicio prediseñado (ECC)

El compuesto cementicio prediseñado, o ECC por sus siglas en inglés, desarrollado por investigadores de la Universidad de Michigan, trata de un compuesto diseñado para cierto desempeño, el caso más notable es el llamado “Bendable Concrete” o concreto flexible: Este es un compuesto a base de mortero auto compactante y reforzado con fibras cortas aleatorias especialmente seleccionadas, normalmente fibras de polímero. A diferencia del concreto regular el compuesto cementicio prediseñado tiene una capacidad de deformación en el intervalo de 3 a 7% (Engineered composites, 2007), en comparación con el 0,1% de cemento Portland ordinario. Por lo tanto, el compuesto cementicio prediseñado actúa más como un metal dúctil que un vidrio quebradizo (como lo hace el cemento portland ordinario), que permite ser empleado en una amplia variedad de aplicaciones (Engineered composites, 2007).

El compuesto cementicio prediseñado, a diferencia de la fibra común del concreto, es una familia de materiales diseñados micro mecánicamente (Li. M, 2011.), en decir que este es un material de cemento que está diseñado y desarrollado en base a la micro-mecánica y mecánica de la fractura para ofrecer gran ductilidad a la tracción. Por lo tanto, no es un diseño de material fijo, sino una amplia gama de temas en diferentes etapas de la investigación , el desarrollo, e implementaciones(Li M., 2012).

Este compuesto cementicio es similar al mortero fabricado con cemento portland, pero a diferencia de este se puede deformar frente a esfuerzos de tensión (Engineered composites, 2007). . El concreto tradicional al mostrar comportamientos débiles a tensión y su comportamiento frágil a compresión, ha sido un factor de empuje en el desarrollo del compuesto cementicio prediseñado. Varios grupos de investigación están desarrollando estos compuestos cementicios, incluidas las de la Universidad de Michigan, la Universidad de Houston, la Universidad de Delft of Technology, la Universidad de Tokio, la Universidad Técnica Checa, y la Universidad de Stanford

Así mismo las mezclas prediseñadas tienen una variedad de propiedades únicas, incluyendo propiedades de tracción superiores a otros compuestos reforzados con fibras, la facilidad de procesamiento a la par con el cemento convencional, el uso de sólo una pequeña fracción de volumen de fibras (aproximada al 2%) (Lepech M.D., 2008), estas propiedades se deben en gran parte a la interacción entre las fibras y la matriz cementante; esencialmente las fibras crean muchas micro fisuras con un ancho muy específico, en lugar de unas pocas grietas muy grandes (como

en el concreto tradicional), esto permite que el compuesto cementicio prediseñado se deforme sin presentar una falla catastrófica (Minard A., 2009).

Este comportamiento de microfisuración conduce a una resistencia superior a la corrosión (las grietas son tan pequeñas y numerosas que es difícil para medios agresivos penetrar y atacar el acero de refuerzo), así como a la auto curación (Minard A., 2009). En presencia del agua (durante una tormenta, por ejemplo), las partículas de cemento (sin reaccionar) expuestas debido al agrietamiento se hidratan y forman una serie de productos (calcio hidrato de silicato, calcita, etc ) que se expanden y se llenan en la grieta (Li M., 2011).

## **7.2 La fibra de vidrio Alcalino-Resistente (AR):**

Desde la antigüedad se han venido realizando una gran variedad de materiales compuestos para la construcción, con el objetivo de lograr piezas duraderas y con características mecánicas cada vez más eficientes, así es como ya se utilizaban ladrillos compuestos por barro y paja de junco triturada. Al descubrirse los materiales cementantes, comienza una era de altas prestaciones en las piezas para la construcción.

Como se presentó anteriormente, el concreto presenta muy buenas características ante la compresión por lo que es una excelente solución para elementos estructurales que trabajen en este tipo de esfuerzo, pero para otras aplicaciones, como por ejemplo el cerramiento de fachadas, tiene el inconveniente de conducir a grandes volúmenes y, por lo tanto, grandes pesos, así como una menor rapidez de

construcción y puesta en obra, lo que, de forma directa, conduce a un alto costo de las piezas por la utilización de una mano de obra calificada y manipulación de las mismas, además ofrece muy escasa resistencia a la tensión, por lo que resulta inadecuado para piezas que tengan que trabajar a flexión o tracción. Estas limitaciones han conducido a numerosas investigaciones y desarrollos para mejorar las resistencias ante estas fuerzas, intentando lograr dentro del mundo de los Materiales Compuestos la solución a esta carencia.

Así pues, ante estas desventajas numerosos trabajos de investigación se pusieron en marcha con el objetivo de aligerar el material y reducir espesores, mediante la adición de distintos tipos de Fibras de Refuerzo, ya que el material que se reemplaza en la mezcla es más pesado que las fibras que lo sustituyen.

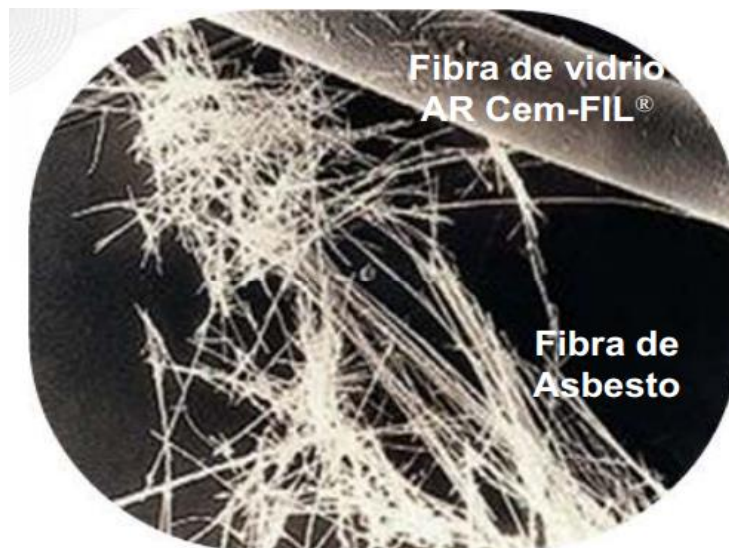


Imagen 4. Diámetro comparativo de fibra de vidrio y asbesto

Los primeros grandes desarrollos se lograron con la utilización de fibras de amianto. El material resultante, llamado “Fibro cemento”, presentaba grandes ventajas de coste y trabajabilidad, pero posteriormente se demostró el carácter cancerígeno de estas fibras, por lo que se prohibió su utilización (Osorio J., 2013)

En 1967 el Dr. A. J. Majumdar, del Building Research Establishment, (BRE) del Reino Unido, empezó a investigar los vidrios que contenían zirconio, logrando convertir en fibra alguno de ellos y demostrando la resistencia que presentaban estas fibras ante el ataque alcalino. Tras 4 años de continuas investigaciones, se logró el refuerzo duradero para los cementos, concreto y en general piezas que puedan verse sometidas al ataque de tipo alcalino. La patente de esta investigación fue solicitada por el National Research Development Corporation (NRDC) y desde ese momento, este tipo de fibras de vidrio fue denominado AR-Glassfibre, o fibra de vidrio AR (de Alkali-Resistant), aunque en la actualidad, se han descubierto también las propiedades Ácido-resistentes de este vidrio, lo que ha dado lugar a otras aplicaciones y marcas comerciales.

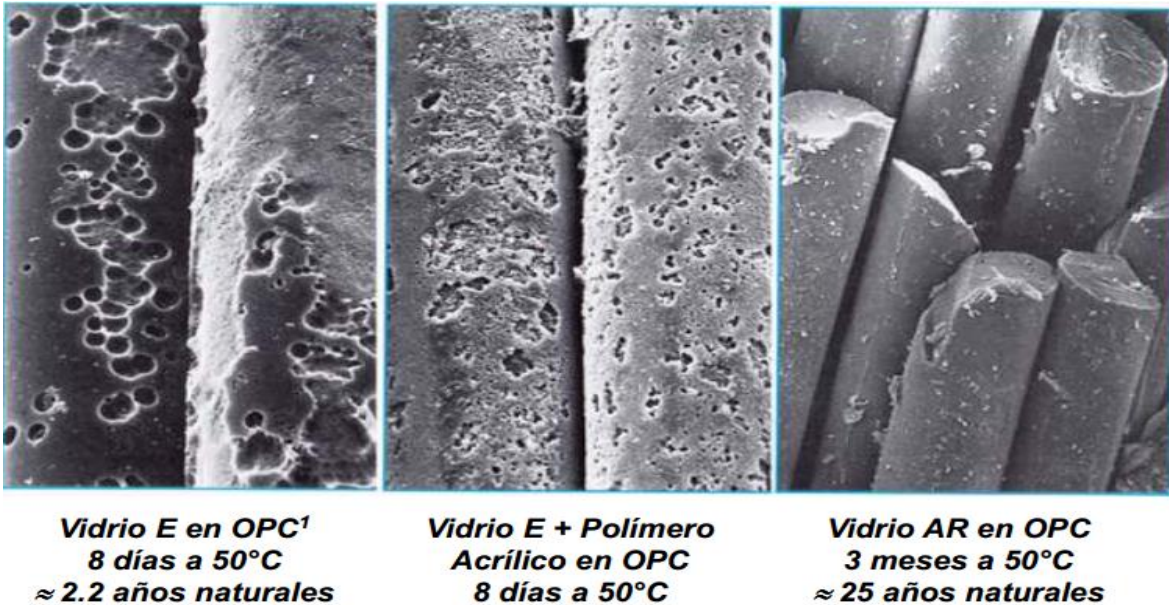


Imagen 5. Comportamiento de las fibras de Vidrio frente a los álcalis.

Además es importante resaltar que estas fibras están específicamente desarrolladas para el refuerzo de productos en cemento y concreto, consiguiendo que los materiales compuestos sean más ligeros, versátiles, de elevadas prestaciones mecánicas y duraderas. Algunas de las ventajas de este compuesto es su comportamiento favorable frente a los factores típicos que pueden afectar a la apariencia de un revestimiento como son:

- La carbonatación, ya que es muy baja comparada con la del concreto reforzado normal.
- La permeabilidad, ya que es más baja que la del concreto.
- Los ataques químicos, ya que la fibra resiste ácidos y álcalis por su composición natural.
- No permite ningún crecimiento biológico.
- No se ve afectado por la radiación ultravioleta

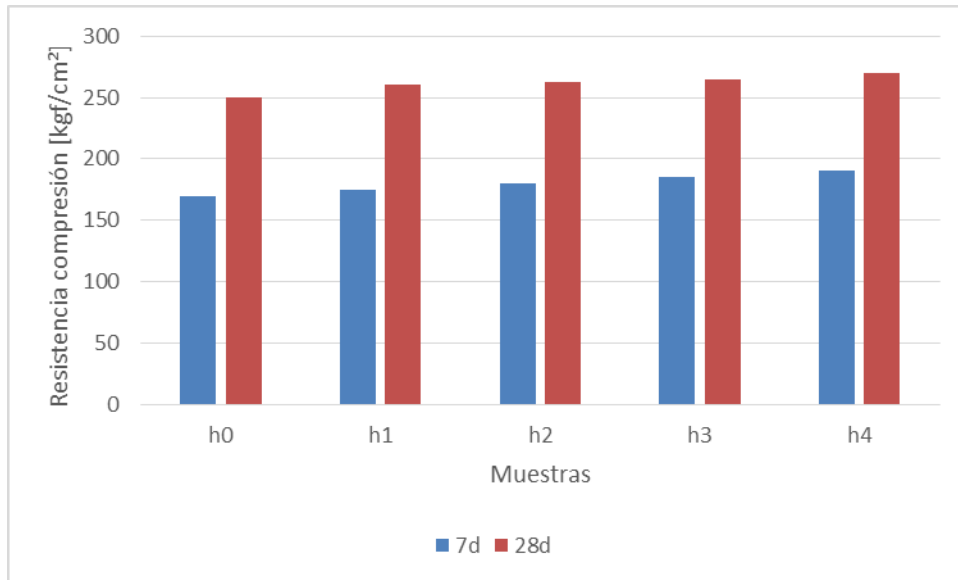
### **7.3 Compuestos Cementicios reforzados con fibra de vidrio**

Varios autores han realizado en los últimos años gran variedad de investigaciones con respecto a la inclusión de fibras de vidrio en materiales cementicios. Por ejemplo se encontró en la literatura, que la resistencia a la compresión se reduce a 5.5kN (un 10%) al estar sometidas las muestras a una temperatura de 80°C contra 6.5kN a 20° en fibras de vidrio, e igualmente con fibras de carbono y de acero, mientras el concreto normal resiste 2 y 1.7 kN a las mismas temperaturas (Abdalla H., 2002).

También se encontró que al reemplazar el cemento con un 10-20% de ceniza volante o ceniza de cascara de arroz o solo 10% con ceniza de combustible de aceite de palma, se mejora la resistencia a compresión (Sujivorakul, et al. 2011).

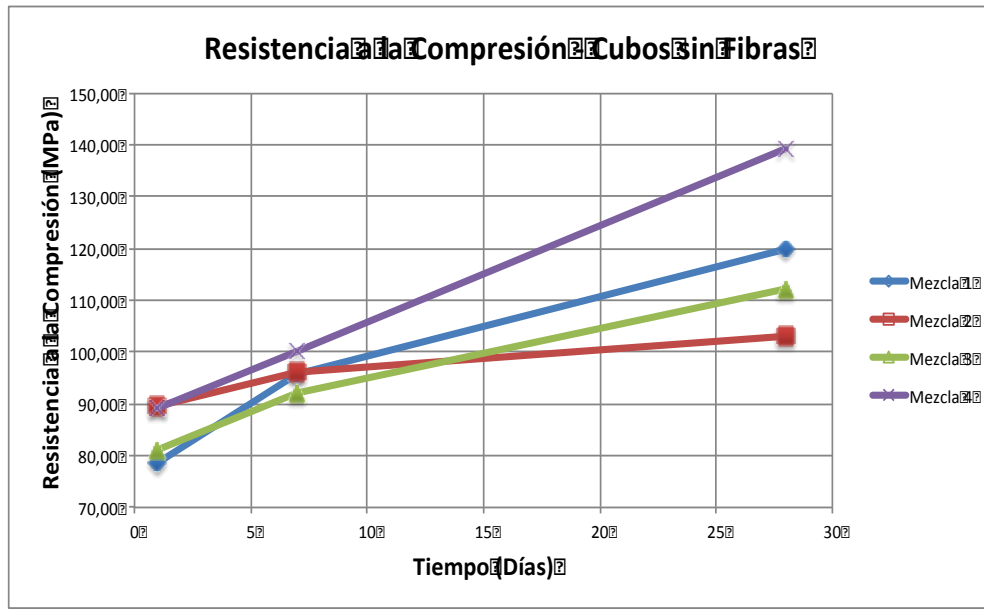
Ahora bien, en la Universidad de Chile se encontró un trabajo de grado del estudiante Bravo quien determinó que a medida que aumenta el porcentaje de fibra de vidrio aumenta la resistencia, este aumento es muy pequeño (4%) con respecto al concreto patrón, es decir que no representa mayor influencia en esta propiedad como se observa en la gráfica 1 (Bravo, et al. 2003).





Gráfica 1. Ensayos a compresión a varias edades de falla y de volumen de fibras (Bravo, et al, 2003)

Ya en el ámbito local encontramos el trabajo de grado presentado por el estudiante Nicolás González bajo tutoría del Ing. Jesús Castaño, quienes realizaron ensayos con concretos de ultra alto desempeño obteniendo resistencias entre 96 y 139 MPa a los 7 y 28 días respectivamente, como se observa en la gráfica 2, mientras que con inclusión de fibras metálicas se obtuvieron 90 y 134 MPa a los mismos días con una mezcla reforzada, observando que no se alcanzaron mejoras en este ítem con la inclusión de fibra sino se presentó una disminución, posiblemente por la compactación del material(González N. & Castaño J., 2013).

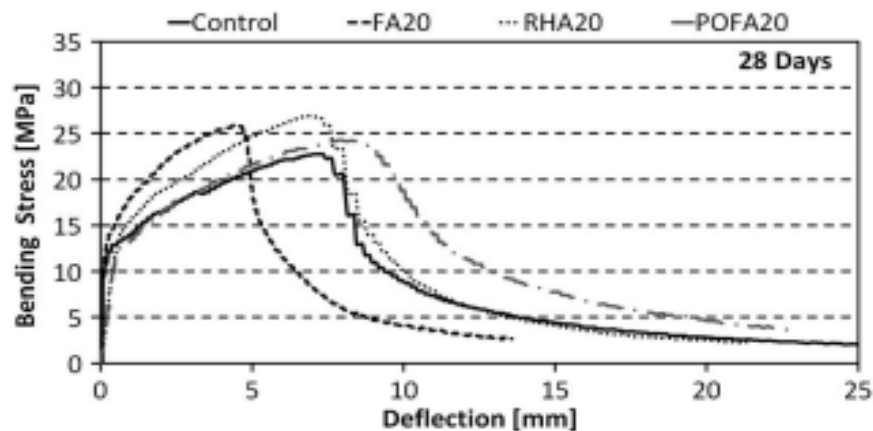


Gráfica 2. Ensayos a compresión de concretos de ultra alto desempeño (González N. & Castaño J, 2013)

El principal factor a tener en cuenta de la aplicabilidad de estas fibras es la resistencia a la flexión que proporcionan en comparación a una muestra sin fibras. Generalmente los paneles de concreto reforzado con fibra de vidrio o GRC (*Glass Fiber Reinforced Concrete*) por sus siglas en inglés, están soportados cerca de su base, ya que el peso propio del panel hace que genere cargas a compresión y se libere gran capacidad a flexo-tracción para soportar las cargas aplicadas, además que es fácilmente moldeable y se pueden utilizar rebordes para proporcionar a la pieza rigidez y resistencia adicional a las fuerzas de tracción.

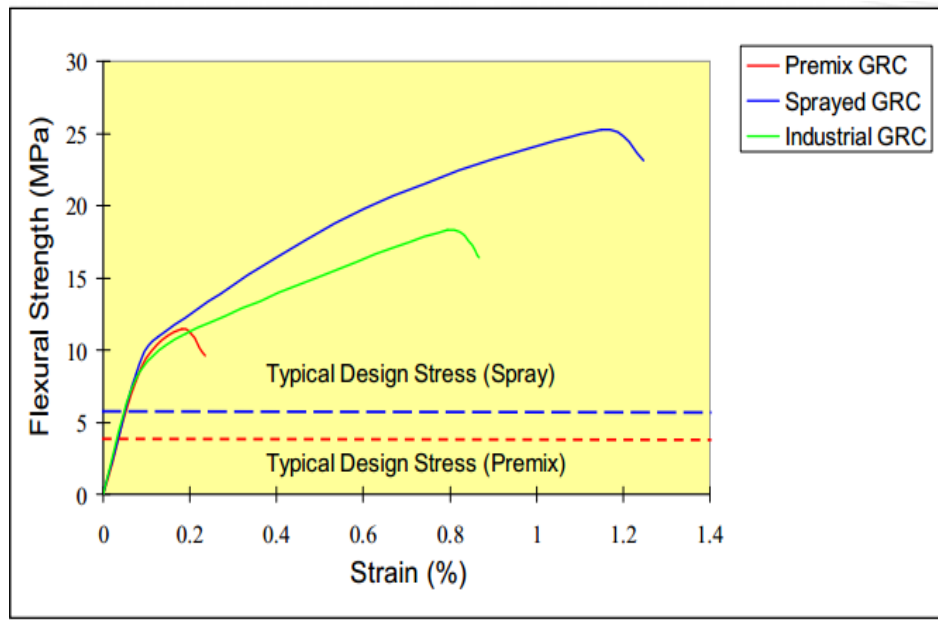
Algunos estudios enfocados en la resistencia a flexión de mezclas con inclusión de fibras arrojaron resultados importantes, como por ejemplo que la carga de falla a flexión (15 kN) en paneles gruesos reforzados con fibras de vidrio fue cerca de 5 veces superior que los paneles sin fibras (3.8kN), sin embargo el autor concluyó que estos paneles resultan más caros en su fabricación (Kim G. & Pilakoutas K., 2007).

En investigaciones realizadas por Sujivorakul et al (2011), estipularon que al igual que la compresión, al reemplazar el cemento con estos componentes mejora la resistencia a la flexión. Además que la ceniza presenta resistencias más altas en el límite plástico o LOP y el módulo de roturo o MOR que otros aditivos utilizados como se detalla en la gráfica 3.



Gráfica 3. Deflexión de concretos reforzados con fibra variando aditivos (Sujivorakul, et al. 2011)

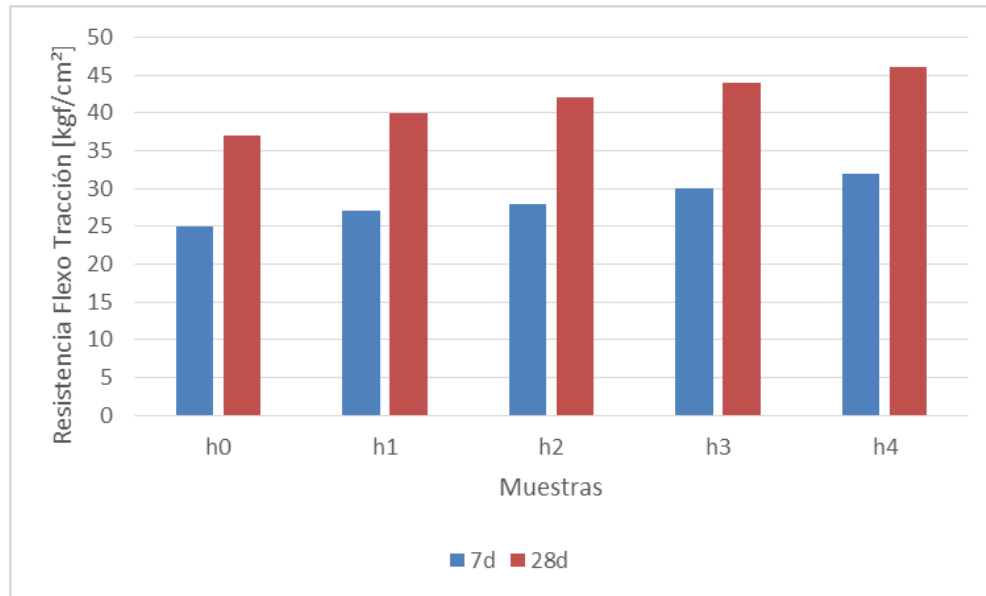
Sin embargo es importante resaltar la importancia de usar fibras de vidrios alcalino-resistentes ya que como se pudo notar en estudios realizados por Enfedaque et al (2008), sobre la superficie de fractura de probetas a tracción, se determinó que la principal razón del deterioro del concreto reforzado con fibras de vidrio es la corrosión que sufre la fibra normal al entrar en contacto con los álcali del cemento tras el paso del tiempo, pues se pierde resistencia y ductilidad.



Gráfica 4. Resistencia a la flexión de acuerdo al contenido de fibra (Fabricante oficial Sumiglas, 2009)

En la gráfica 4 se representa la relación esfuerzo vs deformación de muestras cementicias con fibras de vidrio, donde la muestra de concreto reforzado con fibras de vidrio proyectada tiene mayor contenido en fibra y esta está orientada en 2D, en cambio la muestra de Premix tiene menor contenido en fibra, la longitud es menor y su orientación en 3D, esto es un primer acercamiento a la influencia no solo de las fibras sino también a su cantidad, así como a la longitud empleada de estas.

Es de resaltar además que al aumentar el porcentaje de fibra, incrementando la resistencia obteniendo un 20% de aumento a los 7 días y del 19.4% a los 28 días como se puede observar en la gráfica 5, esto de acuerdo a la investigación antes mencionada del estudiante Bravo en la Universidad de Chile (Bravo, et al. 2003).



Gráfica 5. Resistencia a la flexión variando el volumen de fibras (Bravo, et al, 2003)

Para la fabricación de un compuesto con fibra es importante recordar que la matriz del GRC, normalmente está compuesta por: un mortero de Cemento Portland y arena silícica, amasado con una proporción controlada de agua y aditivos, además la fibra de vidrio se debe agregar en proporciones controladas, determinadas por la aplicación y la resistencia a otorgar a las piezas de GRC. Los componentes más usuales de un GRC son:

- Cemento Portland.
- Arena silícea (>90%).
- Agua descalcificada (potable).
- Fibra de vidrio A.R.
- Aditivos:

1. Plastificantes.
2. Fluidificantes.
3. Superplastificantes.
4. Pigmentos.
5. Impermeabilizantes.
6. Hidrófugos.
7. Polímeros.
8. Elementos puzolánicos especiales, etc.

De acuerdo a las características que se buscan mejorar al diseño del compuesto, se agregara los aditivos adecuados ya sea en cada obra o en base a los requerimientos exigidos en las prescripciones correspondientes.

Bajo la descripción general de concretos reforzados con fibra hay numerosas posibilidades de variar las mezclas, dependiendo del uso del producto final o del método de fabricación. La estandarización está más arraigada en las mezclas empleadas para los concretos arquitectónicos, y las mezclas usadas en el proceso de fabricación por proyección simultánea (Majundar, A. J & Laws, V, 1967)

Existen ya empresas capaces de suministrar previamente mezclados y dosificados todos los componentes anteriormente descritos, salvo el agua e incluso, es posible la comercialización de la mezcla de la matriz seca y la fibra de vidrio para fabricación de concreto reforzado con fibras de vidrio por el proceso de colado vibrado o proyección de pre mezcla (“Manual Forton: Ciment Renforce de Fibras de verre., 2010” )

Según estudios realizados, (Comino, et al. 2007), se encontraron distintos niveles de resistencias adquiridos por un concreto reforzado con fibras a los 28 días, con placas con un espesor normal (10 mm) debido a la influencia del tipo de curado y a la cuantía de fibras empleadas.

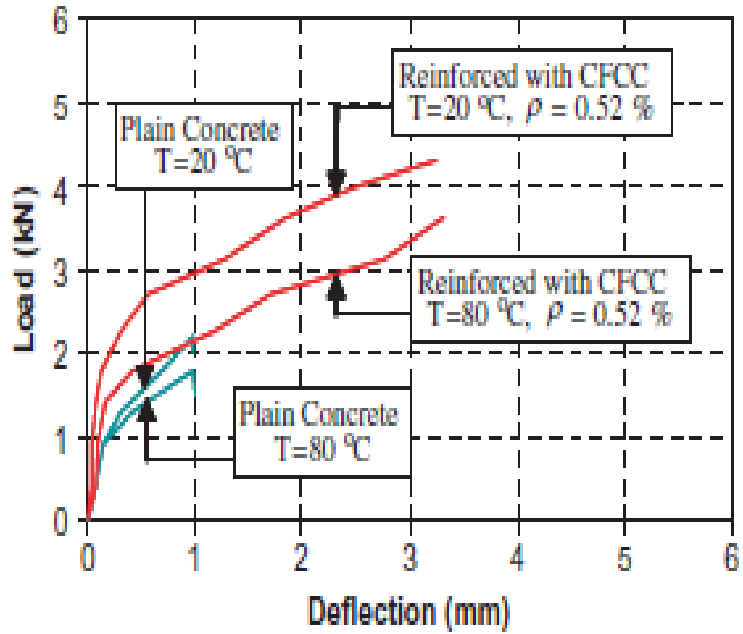
En la última década se han intensificado las investigaciones que tienen que ver con la incorporación de distintas fibras en la matriz de concreto, teniendo en cuenta los ambientes a los cuales serían expuestos y sus consecuencias (Issa, et al. 2011), donde se compara el uso de las diferentes fibras (vidrio, carbón, acero) ante el mismo esfuerzo como se observa en la tabla 3, encontrando por ejemplo que las fibra de acero se ven especialmente afectadas en ambientes agresivos, presentes en algunos países como los del golfo Árabe.

	<b>Unidades</b>	<b>PROYECCIÓN</b> (Manual o Automática)	<b>PREMEZCLA</b> (Colado-Vibrado o proyección)
Fibra Cem-FIL (% en peso)	%	5	3
Flexión			
Módulo de rotura	MPa	20-30	10-14
Límite elástico	MPa	7-11	5-8
Tracción			
Módulo de rotura	MPa	8-11	4-7
Límite elástico	MPa	5-7	4-6
Resistencia al Esfuerzo Cortante			
Resistencia interlaminar	MPa	3-5	
Resistencia en el plano	MPa	8-11	4-7
Resistencia a la Compresión	MPa	50-80	40-60
Resistencia al Choque	Kj/m <sup>2</sup>	10-25	10-15
Módulo de elasticidad	GPa	10-20	10-20
Deformación a la rotura	%	0,6-1,2	0,1-0,2
Densidad del material	T/m <sup>3</sup>	1,9-2,1	1,8-2,0

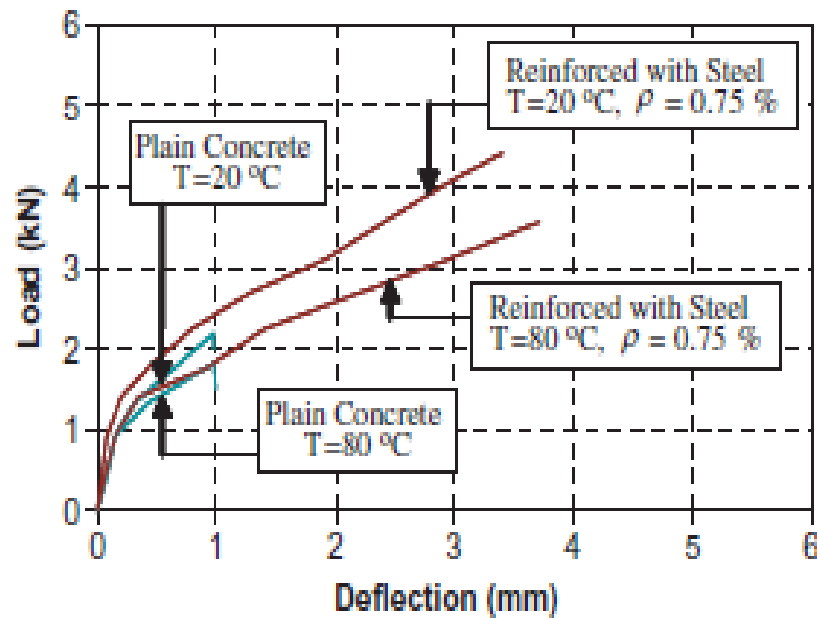
Tabla 3. Resistencias mecánicas a los 28 días de una muestra de GRC (Issa, et al. 2011)

Además se puede resaltar otra ventaja de utilizar otro tipo de fibras, como las fibras de polímero o FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) por sus siglas en inglés, en su uso en ambientes de alta temperatura y alta corrosión ya que las características mecánicas convencionales mejoran frente al acero convencional de refuerzo, sin embargo es de resaltar la importancia de un análisis del mismo comportamiento pero utilizando otro tipo de fibra para así poder comparar las ventajas mecánicas de utilizar una u otra en ambientes de alta temperatura





Gráfica 6. Resistencia a compresión de Fibras de carbón variando la temperatura (Issa, et al. 2011.)



Gráfica 7. Resistencia a compresión de Fibras de acero variando la temperatura. (Issa, et al. 2011.)

En todos los casos se han notado mejoras significativas al usar compuestos en mezclas cementicias como es el caso de la fibra de vidrio y de polipropileno, donde

se han observado aumentos de la resistencia a tensión y a compresión entre 20% y 50%, pero se necesitan más investigaciones para comprobar la relación proporcional derivada de otros tipos de fibras, mayor número de datos de prueba, diferentes contenidos de fibra, el tiempo de curado y otros factores que afectan la durabilidad y resistencia de una muestra de concreto (Choi Y. & Yuan R., 2004).

## **8 METODOLOGÍA**

### **8.1 Emplear 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 ferroatlántico, 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 éterspolicarbólicos 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.

Las granulometrías para la caracterización de los materiales empleados fueron realizadas en el laboratorio de la universidad, adicionalmente se realizó una granulometría laser para los materiales finos, así como el ensayo empleando una probeta de LE CHATELIER para determinar los valores de la densidad del cemento, del humo de sílice y arena silícea. Estos valores se encuentran en el análisis de resultados.

## **8.2 Evaluar la 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, 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.

Para determinar el esfuerzo de flexión, se empleó la Formula 1, descrita en la norma, utilizando valores conocidos como lo son las dimensiones de la probeta y la carga aplicada la cual es suministrada por la maquina empleada. Así mismo la deformación unitaria se define como el cambio por unidad de longitud en una dimensión lineal de un cuerpo, el cual va acompañado por un cambio de esfuerzo, se denomina deformación unitaria debida a un esfuerzo. En este caso se empleó la formula descrita en la norma del ensayo.

9.1 Calculate flexural yield strength ( $F_y$ ) as follows:

$$F_y = P_y / bd^2 \quad (1)$$

where:

$F_y$  = flexural yield strength psi (or MPa),

$P_y$  = force at the point on the force-deflection curve where the curve deviates from linearity, lbf (or N),

$L$  = major support span, in. (or mm),

$b$  = width of specimen, in. (or mm), and

$d$  = depth of specimen, in. (or mm).

Fórmula 1. Calculo de esfuerzo de flexión

### **8.3 Analizar la 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; la cual está diseñada para verificar las propiedades de flexión determinado por este método de ensayo, tal cual como se realizó para desarrollar el numeral 8.2

## **9 RESULTADOS ESPERADOS**

Con la elaboración de este trabajo de investigación se pretende ampliar el conocimiento de materiales de ultra-alto desempeño en el ámbito local con un mejoramiento en su comportamiento a flexión mediante refuerzo con fibras de vidrio y su posible aplicación en construcciones de obras civiles.

## **10 RESULTADOS Y ANÁLISIS**

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 última potencial e incrementar sustancialmente la durabilidad (González N., Castaño J., 2013).

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.

## **10.1 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 INVE 222-07. A continuación se presentan las propiedades mecánicas obtenidas de las mezclas tales como la resistencia a compresión, flexión y el módulo de elasticidad a varias edades de falla, empleando los ensayos establecidos para tal fin.

Los materiales empleados para la fabricación de los compuesto cementicios de ultra-altas resistencias fueron: humo de sílice, arena silícea procedente de Zipaquirá Cundinamarca, con un tamaño entre 45 y 1180  $\mu\text{m}$ , fibras de vidrio (diámetro de filamento de 14 $\mu\text{m}$  con longitudes variables de 12 mm (FG-12 mm) y 36 mm (FG-36mm) y que poseían un peso específico de 2,68 g/cm<sup>3</sup>); un aditivo hiperplastificante Pozzolith 460N y finalmente el Cemento Portland.

Los valores que se determinaron de 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, por medio del frasco de LE CHATELIER de acuerdo con el procedimiento en ella. La gravedad específica y absorción de la arena fue determinada también siguiendo los pasos establecidos en la norma I.N.V.E – 222-07.

Material	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Cemento	3.17
Humo de Sílice	2.65
Arena silíceo	2.53

Tabla 4. Densidad de los materiales.

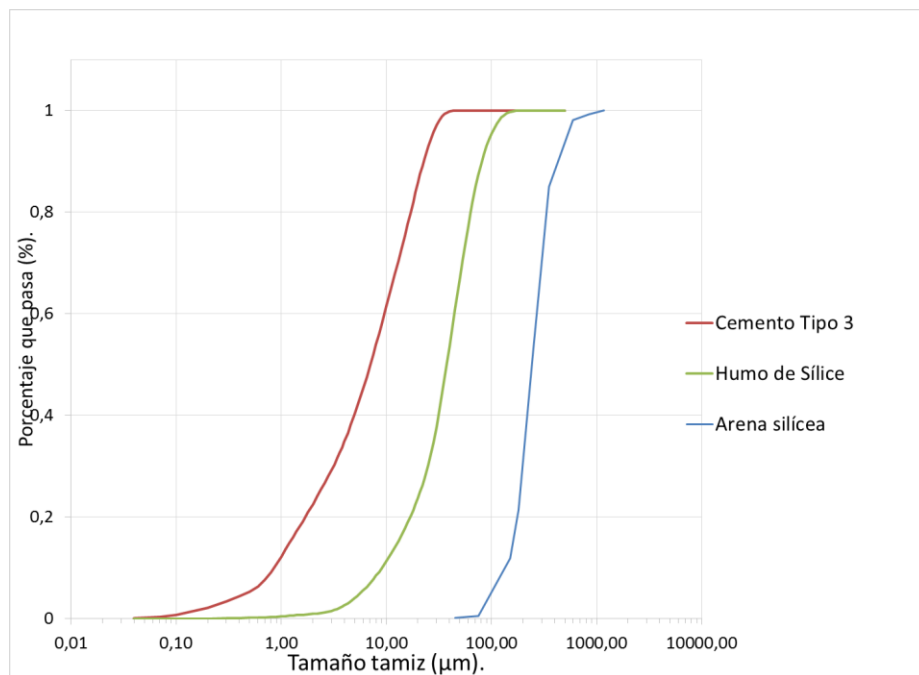
Las características del hiperplastificante Pozzolith 460N fueron suministrados por el productor de dicho material (BASF-The Chemical Company, 2013) las cuales están consignadas en la Tabla 5, que garantiza un aumento de las resistencias iniciales y finales del concreto cuando se emplea como reductor de agua, también mejora la impermeabilidad y durabilidad del concreto al disminuir la porosidad del mismo e incluso permite obtener concreto fluido sin segregación ni sangrado entre otras ventajas. La dosificación habitual que se maneja en una mezcla es de 0,3 a 1,4% sobre el peso del cemento, aunque esto varía en función de las necesidades de fluidificación, reducción de agua y resistencias iniciales y finales deseadas.

Aditivo Súper - Plastificante	
Aspecto	Líquido poco turbio
Densidad @+20°C	1.05 ± 0.02 g/cm <sup>3</sup>
pH @+20°C	6.5 ± 1
Viscosidad @+20°C	< 60 cps
Contenido Halógenos	< 0.1%
Punto de congelación	0°C

Tabla 5. Características técnicas del Pozzolith460N (Aditivos para Concreto Premezclado, 2013 )



También se realizaron las granulometrías del cemento Portland, del humo de sílice y de la arena sílicea de Cundinamarca, para su realización se utilizó una serie de tamices con diferentes diámetros que son ensamblados en una columna, donde se retienen porcentajes del material a evaluar a través de una granulometría laser. Esta granulometría parte del principio de la difracción por rayos laser, consiste en hacer pasar una muestra en seco o en suspensión en un líquido no reactivo, a través de un rayo láser monocromático. Según la teoría de Fraunhofer descrita por Weisstein (2006), se origina una figura de difracción en el detector. De este modo se consigue obtener el análisis granulométrico de las partículas con lo cual se crea la curva granulométrica que permite visualizar la tendencia homogénea o heterogénea de las partículas (Diámetros).



Gráfica 8. Granulometría de los materiales utilizados.

Las distribuciones granulométricas observadas en la Gráfica 8, 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. Así fue que se planteó una mezcla ideal, la cual se hizo una proporción de materiales de acuerdo con la literatura estudiada.

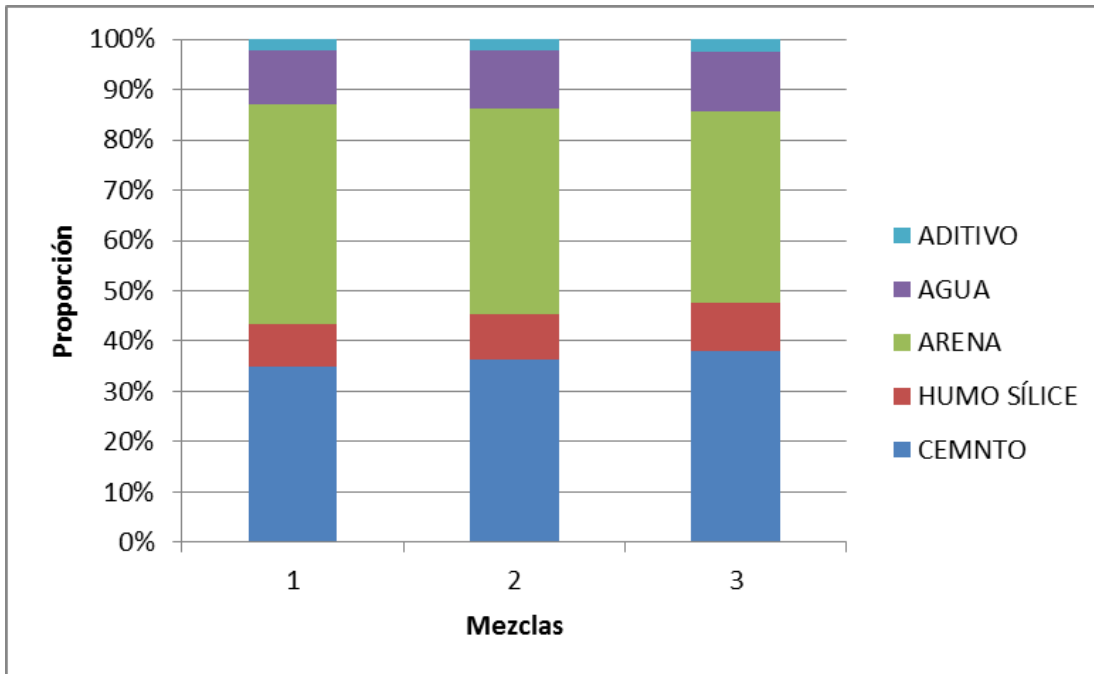
## **10.2 Mezclas de prueba**

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).

Las muestras fueron diseñadas con la caracterización previamente señalada variando únicamente el contenido de arena en las dosificaciones obtenidas, esto se observa en la Tabla 6 y la Gráfica 9, expresadas por unidad de cemento, y el aditivo expresado en porcentaje del peso de los cementantes.

MEZCLA	1	2	3
Cemento	1	1	1
HS	0.25	0.25	0.25
Arena Silíceas Fina	1.25	1.13	1.00
A / Cementante	0.30	0.30	0.30
Aditivo (%W/cm)	6%	6%	6%

Tabla 6. Dosificación de las mezclas



Gráfica 9. Porcentaje materiales en la dosificación

Como se puede observar la única variación que se realizó fue en el contenido de arena sílicea 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 la cual fue trabajada por el ingeniero Jesús Castaño y el ingeniero Nicolás González.

Para realizar un concreto de ultra alto desempeño se utilizó el siguiente procedimiento:

1. Pesar los materiales.



Imagen 6. Peso material en báscula.

2. Mezclar los granulares y cementantes en seco, a velocidad 1 durante 2 minutos.



Imagen 7. Mezcla de materiales

3. Adicionar 70% del agua y Mezclar a velocidad 1 durante 2 minutos.



Imagen 8. Materiales con 70% agua

4. Adicionar el restante del agua con el aditivo y mezclar a velocidad 1 durante 10 minutos y llenar los moldes.

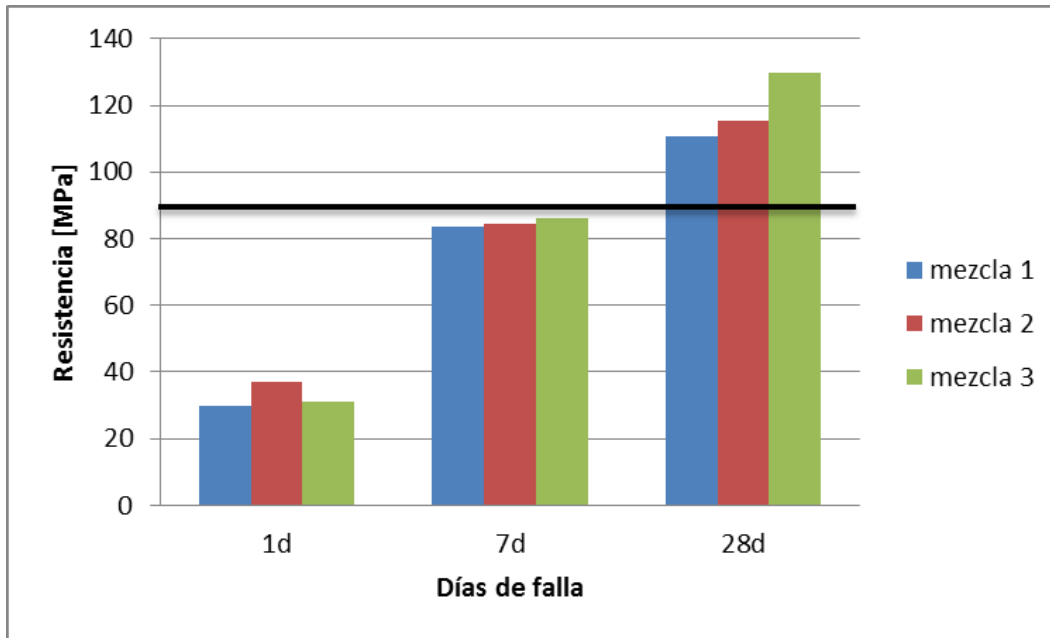


Imagen 9. Llenado de moldes

Las mezclas de ultra alto desempeño, fueron producidas empleando una mezcladora la cual es de uso común para la fabricación de morteros, de 2.25 litros de capacidad, es importante señalar que estas mezclas son autocompactantes por lo cual no es necesario realizar el procedimiento del vibrado usual.

Con las muestras obtenidas se realizaron ensayos de compresión a 1, 7 y 28 días para determinar que mezcla presentaba un mejor comportamiento verificando que su resistencia a compresión fuese superior a la de un mortero convencional, la cual ronda alrededor de 20 MPa y así mismo lograr que la mezcla superara el límite planteado de los 110 MPa. Los cubos empleados para realizar los ensayos a compresión fueron cubos de 50mm x 50mm x 50 mm elaborados con la norma NTC 220 (ASTM-C109).

A partir de los datos obtenidos representados en la Gráfica 9, se registró que las mezclas presentaron una resistencia superior 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.



Gráfica 9. Resistencia a la compresión de las mezclas

Se observa en la Gráfica 9 que al pasar los días la resistencia a la compresión incrementa, de esta forma la resistencia lograda a los 7 días de curado es aproximadamente de un 75% de su resistencia máxima, estos resultados son considerablemente mayores a los resultados de una mezcla normal los cuales oscilan entre 18MPa a 25 MPa a los 28 días de curado.

En la Imagen 10 se aprecia que los cubos presentaron rupturas explosivas a los 28 días de curado, este tipo de falla es debido a las elevadas cargas que se requirieron para llegar a la falla de las muestras (más de 300 kN)



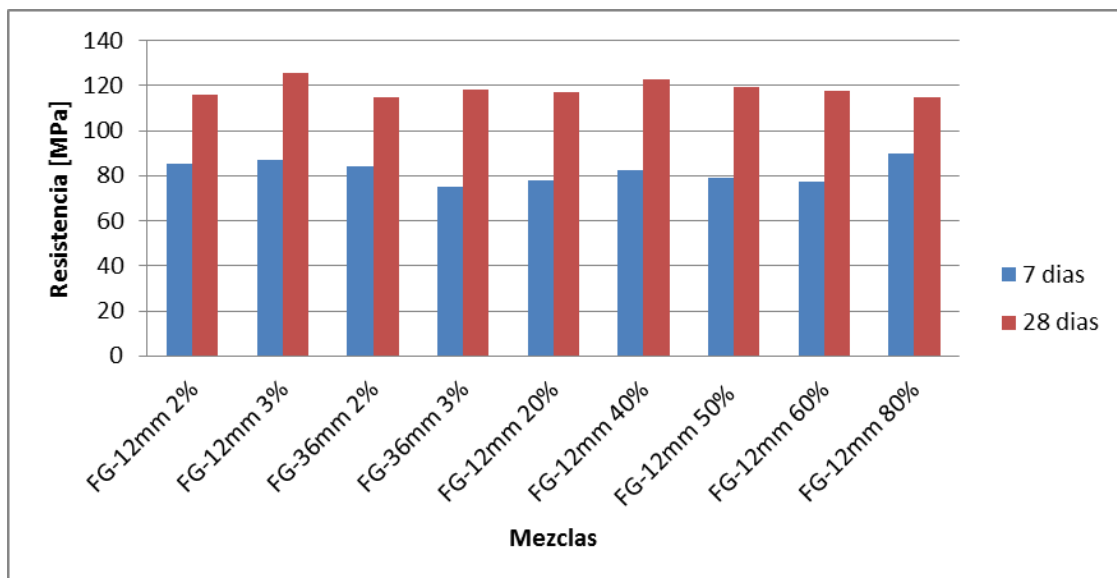
Imagen 10. Fallas de cubos 28días



## 10.3 Mezcla con fibras

### 10.3.1 Compresión

Para corroborar los resultados obtenidos en el trabajo de investigación por el ingeniero Jesús Bravo de la universidad de Chile y el trabajo realizado por los ingenieros Jesús castaño y Nicolás González, se realizaron ensayos a compresión de cubos con fibra de vidrio variando su proporción en la matriz cementicia para determinar la influencia de la fibra en este tipo de comportamiento. El proceso para realizar las mezclas con fibra de vidrio es igual al procedimiento para realizar los cubos de alto desempeño (descrito anteriormente), la diferencia radica que en el último paso se agregaron las respectivas fibras de vidrio, de igual forma en el procedimiento no se realizó el vibrado usual, ya que este afecta la configuración de las fibras en la matriz cementicia segregándolas. Los resultados de dichos ensayos se observan en la gráfica 10.



Gráfica 10. Resistencias a compresión mezclas con inclusión de fibras.

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 mortero que esta alrededor de 17 MPa (Días, et al. 2011). 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.

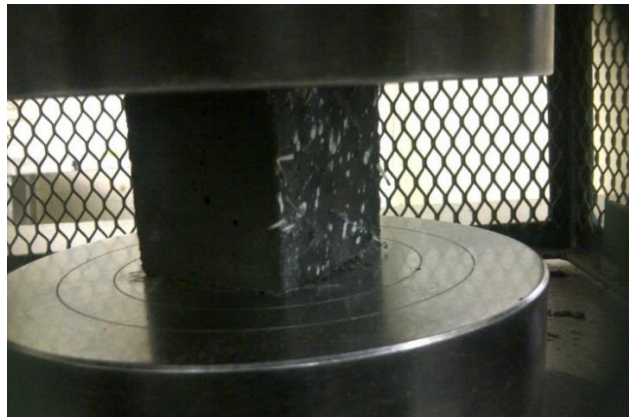


Imagen 11. Ensayo a compresión de cubos.



Imagen 12. Falla típica de cubo de mortero con fibras de vidrio

Como se detalla en la Imagen 11 y la Imagen 12 en los cubos con fibra de vidrio se pudo observar que el tipo de falla varió con respecto a los cubos de control, ya que en estos se presentaban fallas explosivas, en cambio al poseer fibras de vidrio en la matriz se generó fallas por aplastamiento gracias a que las mismas fibras generan un agarre entre los componentes lo que evita que se presente desprendimiento de material.

### 10.3.2 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 se realizó montaje de dicho ensayo, la cual se realizó en la Instron 3369 como se muestra en la Imagen 13, es de resaltar que esta herramienta nos ofrece la posibilidad de obtener el tiempo cada 0.1 segundos, 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.

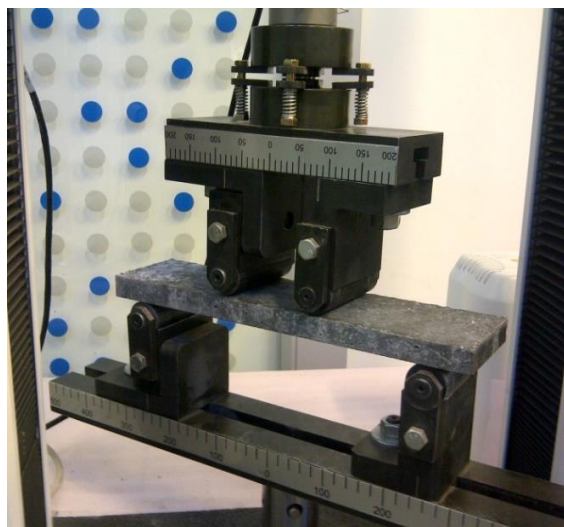
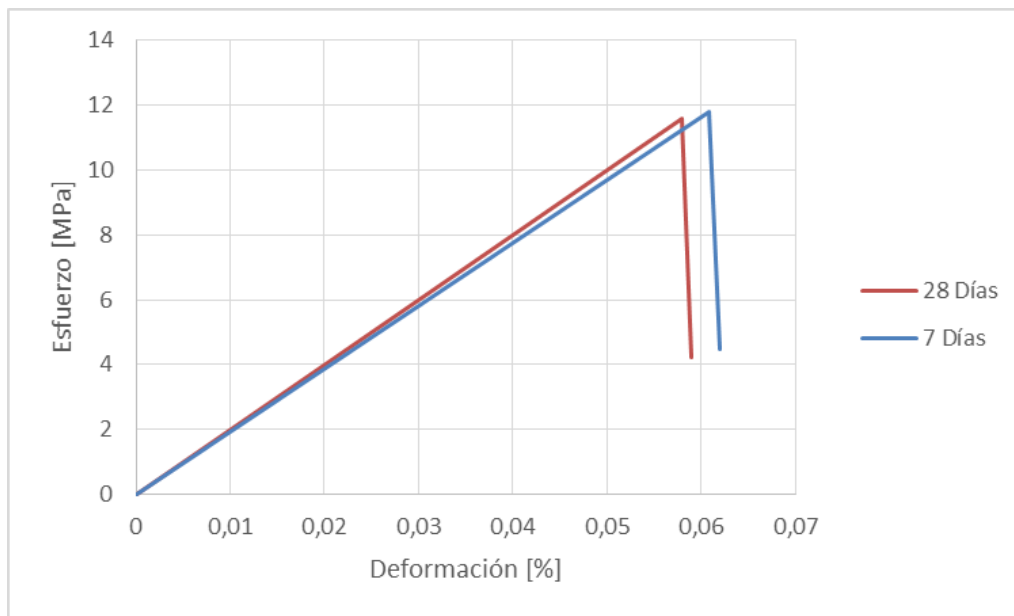


Imagen 13. Montaje de probetas

Es por tal motivo que se realizaron probetas de aproximadamente 20 mm de espesor, 300 mm-320 mm de largo y 75 mm de ancho, estas probetas se fallaron a edades de 7 y 28 días utilizando la norma ASTM C947 (método estándar para propiedades de flexión en secciones delgadas de concreto con fibra de vidrio, vigas simplemente apoyadas cargadas al tercio medio).

Para poder realizar una comparación de la influencia de las fibras de vidrio en la matriz cementicia se realizó el ensayo a flexión (ASTM C947) en una probeta sin contenido de fibras de vidrio; Los resultados obtenidos se muestran en la Gráfica 11.

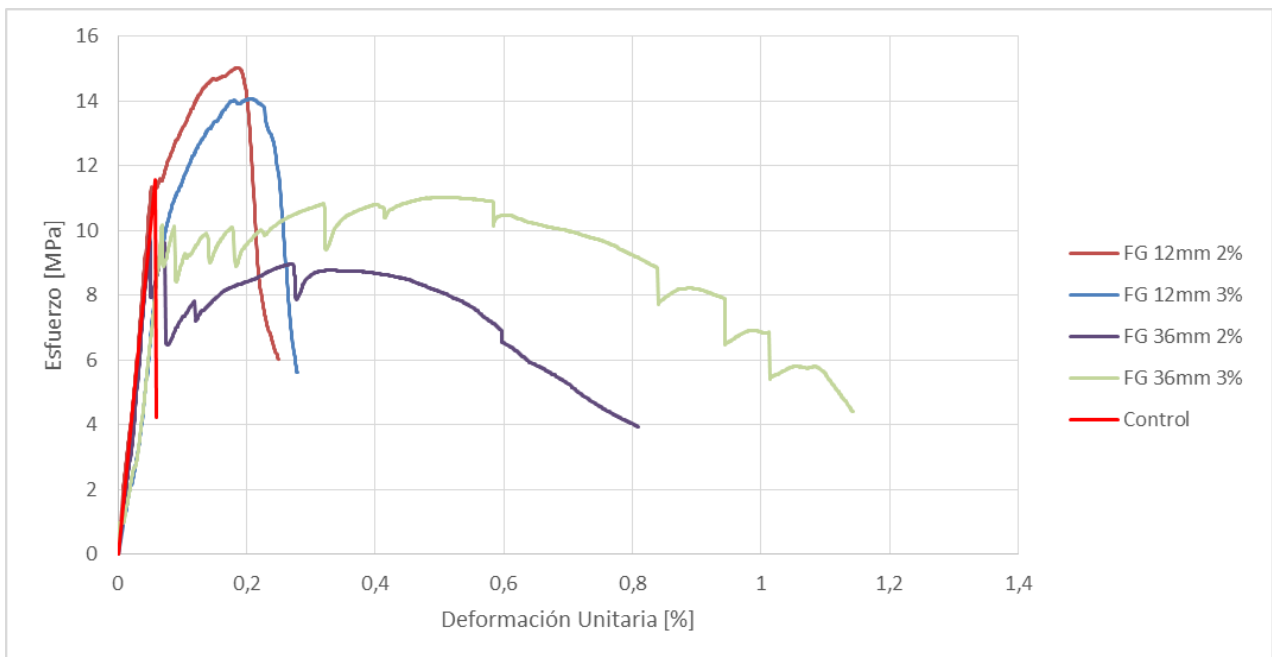


Gráfica 11. Esfuerzo vs deformación muestra de control

De la Gráfica 11 se obtuvo 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.

En la Gráfica 12 y en la Gráfica 13 se ilustran los resultados obtenidos al realizar el ensayo a flexión en las probetas con inclusión de fibra de vidrio en las proporciones anteriormente descritas (ver metodología).

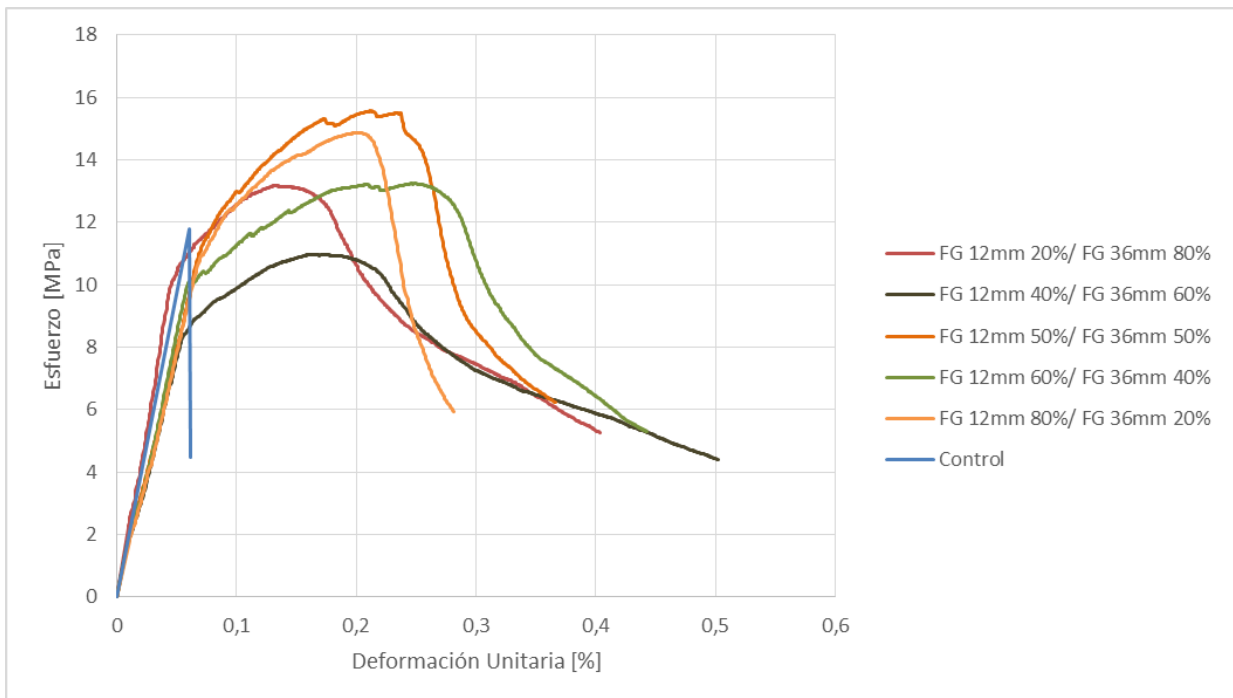


Gráfica 12. Esfuerzo vs deformación mezclas sin combinar a 7 días

En la Gráfica 12 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 35% 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 Gráfica 13.



Gráfica 13. Esfuerzo vs deformación mezclas combinadas a 7 días

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. Los resultados de la Gráfica 12 y la Gráfica 13 se pueden encontrar en la Tabla 7 y Tabla

8 donde se especifica el límite de proporcionalidad o LOP por sus siglas en inglés y el módulo de rotura o MOR por sus siglas en inglés con sus respectivas deformaciones.

Mezcla	Límite de Proporcionalidad 7 días [MPa]	Variación a mezcla de control	Deformación unitaria [%]
FG-12mm 2%	11,30	-3,44%	0,065
FG-12mm 3%	9,39	-19,76%	0,070
FG-36mm 2%	10,02	-14,38%	0,073
FG-36mm 3%	10,09	-13,81%	0,085
control	11,71	0,00%	0,060
FG-12mm 80%	10,91	-6,79%	0,072
FG-12mm 60%	10,02	-14,38%	0,065
FG-12mm 50%	10,65	-9,01%	0,077
FG-12mm 40%	8,46	-27,69%	0,050
FG-12mm 20%	10,11	-13,63%	0,055

Tabla 7. Módulos de límite de proporcionalidad 7 días

En la Tabla 7 se cuantifican los resultados de desempeño de las probetas, las cuales evidencian que una combinación igual entre fibras aporta a la deformación un 28% en comparación con la probeta de control. El límite de proporcionalidad de la muestra de control es mayor aproximadamente 10% a las probetas con inclusión de fibra de vidrio, esto debido al volumen ocupado por las fibras en la matriz y la generación de vacíos que se producen, lo que impide que la matriz trabaje de forma adecuada disminuyendo el esfuerzo. Es en ese momento que las fibras trabajan logrando mejorar el esfuerzo último y su deformación.

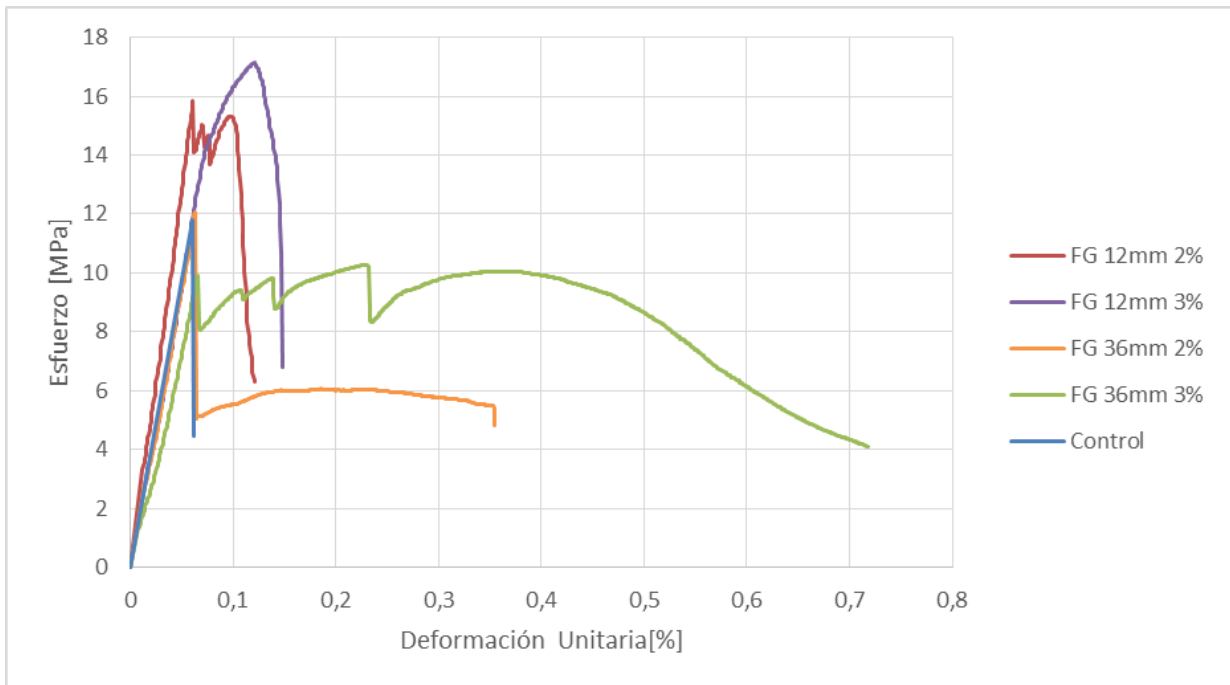
Mezcla	Modulo de rotura 7 días [MPa]	Variación a mezcla de control	Deformación unitaria [%]
FG-12mm 2%	15,03	28%	0,22
FG-12mm 3%	14,06	19%	0,23
FG-36mm 2%	8,75	-26%	0,35
FG-36mm 3%	11,10	-6%	0,53
control	11,78	0%	0,06
FG-12mm 80%	14,86	26%	0,26
FG-12mm 60%	13,22	12%	0,25
FG-12mm 50%	15,48	31%	0,23
FG-12mm 40%	10,98	-7%	0,25
FG-12mm 20%	13,11	11%	0,14

Tabla 8. Módulos de rotura 7 días

En la Tabla 8 se cuantifican los resultados de desempeño de las probetas cuando éstas alcanzan su mayor esfuerzo (módulo de rotura) y su respectiva deformación. Es importante resaltar que todas las probetas mostraron mejoras tanto en esfuerzo y/o deformación; la probeta con fibras combinadas que obtuvo un mejor desempeño fue la FG-12mm 80% ya que presentó un comportamiento equilibrado en esfuerzo y deformación, sin embargo la que mejor esfuerzo presentó fue la FG-12mm 50%, esto confirma que al emplear diferentes combinaciones de fibra de vidrio se logran obtener resultados que optimizan el comportamiento a flexión de las muestras.

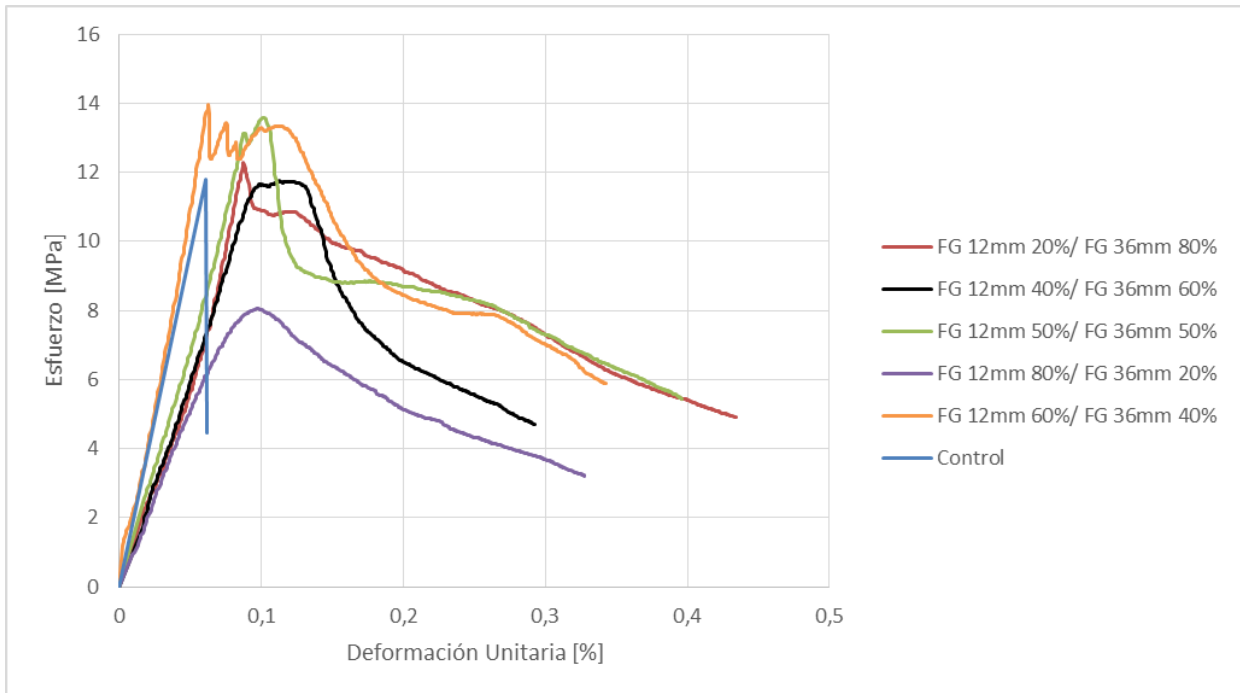


En la Gráfica 14 podemos observar los resultados obtenidos al realizar los ensayos a flexión en las probetas con un solo tamaño de fibra a los 28 días de edad. Se observa un comportamiento diferente al analizado en la Gráfica 12.



Gráfica 14. Esfuerzo vs deformación 28 días

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 empleada, 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.



Gráfica 15. Esfuerzo vs deformación 28 días mezclas combinadas

En la Gráfica 15 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 como se observa en la Imagen 14 e Imagen 15. Así mismo solo se presentó una fisura en el centro de la luz, y no una multifisuración como se encontró en la literatura.



Imagen 14. Falla probeta con fibras de FG-36mm y FG-12mm



Imagen 15. Falla de probeta con fibras FG-12mm y FG-36mm

Mezcla	Límite de Proporcionalidad 28 días [MPa]	Variación a mezcla de control	Deformación unitaria [%]
FG-12mm 2%	15,70	34,13%	0,06
FG-12mm 3%	14,19	21,23%	0,07
FG-36mm 2%	11,83	1,07%	0,06
FG-36mm 3%	9,73	-16,87%	0,06
control	11,71	0,00%	0,06
FG-12mm 80%	8,04	-31,31%	0,10
FG-12mm 60%	13,69	16,96%	0,07
FG-12mm 50%	13,14	12,26%	0,11
FG-12mm 40%	11,64	-0,56%	0,10
FG-12mm 20%	12,30	5,08%	0,09

Tabla 9. Módulos de límite de Proporcionalidad 28 días

En la Tabla 9 se encuentran los resultados del límite de proporcionalidad donde se observa que la combinación que emplea 50% de FG-12 mm y 50% de FG-36 mm es la que mejor muestra desempeño en deformación (83%) mientras la del 60% de FG- 12 mm y 40% de FG-36 mm desempeña un mejor esfuerzo (12.37 MPa). En comparación con la probeta de control podemos ver que alcanza aproximadamente el doble de deformación con el 50% más de esfuerzo. En general todas las probetas tienen mayor deformación que la probeta de control sin exceder el límite plástico, lo que sugiere que las combinaciones con fibras de vidrio y la matriz de alto desempeño se comportan de una manera adecuada a lo que se había esperado.

Mezcla	Modulo de rotura 28 dias [MPa]	Variación a mezcla de control	Deformación unitaria [%]
FG-12mm 2%	15,83	34,35%	0,11
FG-12mm 3%	17,13	45,38%	0,12
FG-36mm 2%	6,01	-48,98%	0,20
FG-36mm 3%	10,01	-15,03%	0,38
control	11,78	0,00%	0,06
FG-12mm 80%	7,96	-32,43%	0,11
FG-12mm 60%	13,26	12,56%	0,12
FG-12mm 50%	13,04	10,69%	0,11
FG-12mm 40%	11,75	-0,25%	0,18
FG-12mm 20%	12,10	2,71%	0,13

Tabla 10. Módulos de rotura 28 días

El módulo de rotura es aquel donde el esfuerzo es el máximo alcanzado por la probeta antes de fallar, cabe resaltar que en la probeta de control la falla es súbita, por lo tanto el límite de proporcionalidad es igual al módulo de rotura.

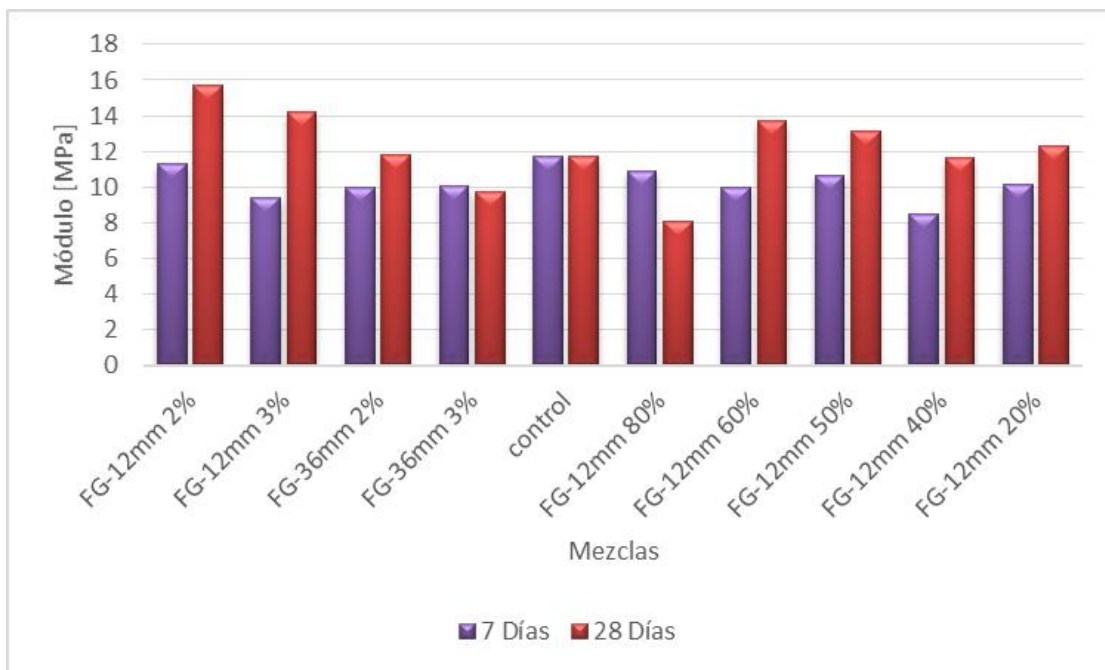
En la Tabla 10 se evidencia el gran desempeño que tienen las fibras en combinación con la matriz de ultra alto desempeño, ya que el 95% de estas nos muestran una notable mejora tanto en deformación como en esfuerzo. La que mejor tuvo desempeño en cuanto a deformación fue la mezcla que tiene 40% de FG-12 mm y 60 % de FG-36 mm, y en cuanto a esfuerzo la mezcla que tiene 60% de FG-12 mm y 40% de FG-36 mm.

Mezcla	E [MPa] 7 días	E [MPa] 28 días	Variación 7 días	Variación 28 días
FG-12mm 2%	33992	36786	27%	21%
FG-12mm 3%	30217	32745	13%	8%
FG-36mm 2%	30735	34522	15%	14%
FG-36mm 3%	30335	33763	14%	11%
control	26702	30369	0%	0%
FG-12mm 80%	30402	33764	14%	11%
FG-12mm 60%	25954	33641	-3%	11%
FG-12mm 50%	29943	35189	12%	16%
FG-12mm 40%	30203	31216	13%	3%
FG-12mm 20%	28975	31216	9%	3%

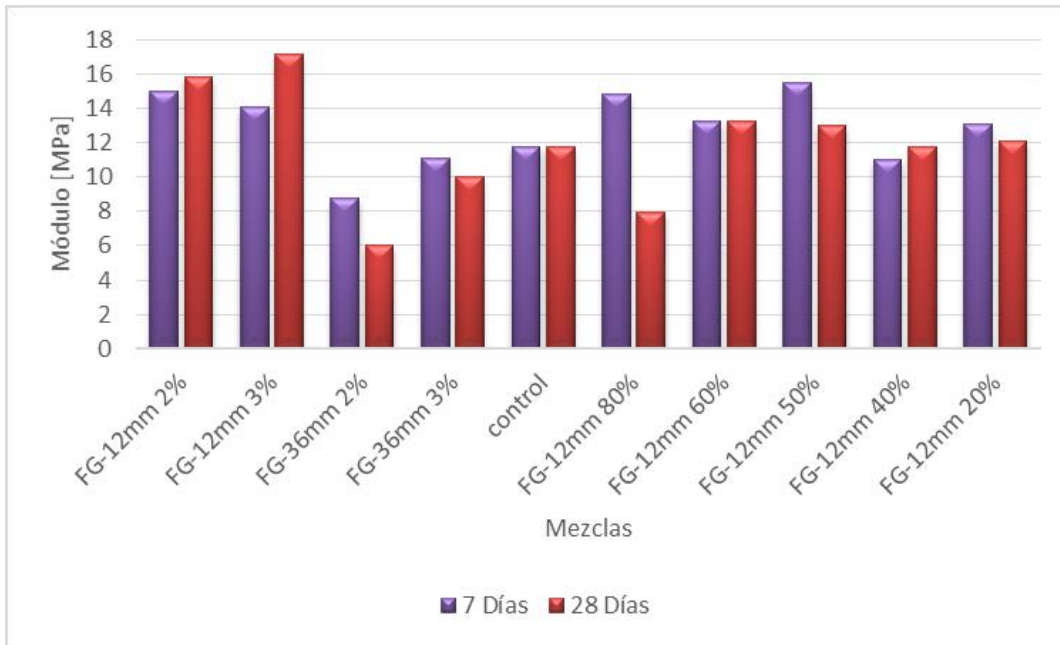
Tabla 11. Módulos de elasticidad 7 días y 28 días

Se observa en la Tabla 11 que los módulos de elasticidad en las probetas falladas a 7 días se encuentran en un rango de 28975 MPa y 33992 MPa, por otra parte la probeta de control de esta misma edad de falla tiene un módulo de elasticidad de 26702 MPa, lo cual nos indica que las mezclas que contienen fibra de vidrio tienen un módulo más alto, en especial la mezcla que tiene 2% de FG-12mm. Así mismo en la siguiente columna podemos ver los módulos de elasticidad de las probetas falladas a 28 días, donde se distingue el aumento del módulo de elasticidad en aproximadamente un 11%, es decir que prácticamente a los 7 días este material alcanza un 90% de su capacidad elástica.

En la Gráfica 16 se muestra el cambio que tuvo el módulo límite de proporcionalidad en 7 días y 28 días. Se puede apreciar de mejor forma el incremento que existe en este al pasar de los días, sin embargo el límite de proporcionalidad desarrolla de 90% a 95% de su capacidad en los 7 primeros días como se ve en la gráfica. Así mismo se muestra la mejoría del módulo de rotura y su incremento en el paso de los días. Es importante resaltar que cuando se comparan el módulo de proporcionalidad y el módulo de rotura se observa un incremento de aproximadamente 15%, que corresponde al endurecimiento del material hasta su falla final.



Gráfica 16. Límite de Proporcionalidad de las diferentes mezclas



Gráfica 17. Módulo de rotura de las diferentes mezclas

En la Gráfica 17 se puede evidenciar el incremento que se presentó en el módulo de rotura el cual es aproximadamente entre un 8% y un 12%, lo que nos indica que este material puede alcanzar altas resistencias en edades tempranas, de aquí saldrán recomendaciones para la emplear este material.

La norma ASTM C947 considera hasta un 90% de la capacidad máxima para dar por terminado el ensayo, en este punto obtuvimos el esfuerzo de con su respectiva deformación, las cuales se encuentran consignados en la Tabla 12 y en la Tabla 13.



<b>Mezcla</b>	<b>90% de la resistencia 7 días [MPa]</b>	<b>Deformación unitaria [%]</b>
FG-12mm 2%	13,53	0,24
FG-12mm 3%	12,66	0,27
FG-36mm 2%	9,02	0,08
FG-36mm 3%	9,26	0,74
control	10,60	0,12
FG-12mm 80%	13,37	0,28
FG-12mm 60%	9,88	0,26
FG-12mm 50%	13,86	0,17
FG-12mm 40%	9,88	0,26
FG-12mm 20%	12,50	0,80

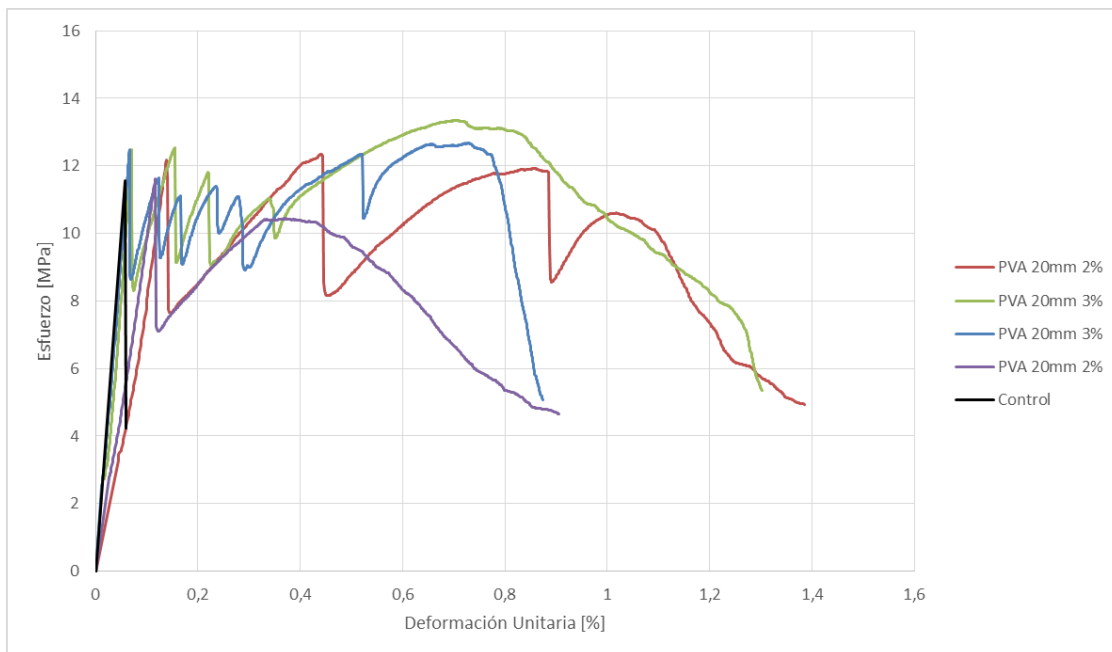
Tabla 12. Esfuerzo y deformación al 90% 7 días

<b>Mezcla</b>	<b>90% de la resistencia 28 días [MPa]</b>	<b>Deformación unitaria [%]</b>
FG-12mm 2%	14,24	0,11
FG-12mm 3%	15,41	0,19
FG-36mm 2%	10,88	0,15
FG-36mm 3%	9,93	0,30
control	10,60	0,11
FG-12mm 80%	13,68	0,12
FG-12mm 60%	12,57	0,27
FG-12mm 50%	13,52	0,20
FG-12mm 40%	10,58	0,13
FG-12mm 20%	11,20	0,13

Tabla 13. Esfuerzo y deformación al 90% 28 días

## 10.4 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 Gráfica 17 muestra que la probeta con PVA 20mm presenta una gran deformación, en comparación a la Gráfica 12 de las probetas que contienen fibra de vidrio; sin embargo ambas gráficas muestran una gran mejora respecto a la muestra de control especialmente en deformación.



Gráfica 17. Esfuerzo vs deformación mezclas con inclusión de fibras de Polivinilo de Alcohol; Edad de falla 7 días.

Al momento de presentarse la falla en las probetas con PVA 20mm que se realizaron pudimos observar que se forman entre 3 y 5 grietas a diferencia de la falla de las

probetas con fibra de vidrio Alcalino Resistente como se muestra en la Imagen 16 y en la Imagen 17.



Imagen 16. Falla de probetas con PVA 20mm

Estos resultados han sido de gran utilidad para entender en mejor medida porque se presentaron deficiencias de las muestras con fibras de vidrio ante una determinada carga en los ensayos a flexión, así es como a través de los resultados y lo observado en las probetas falladas se considera como el factor más determinante la baja adherencia fibra matriz entre las fibras de vidrio y la matriz cementante de ultra alto desempeño resultando en el deslizamiento de las mismas a medida que se presentan las grietas en contra a lo observado con las fibras de polivinilo; las cuales presentan grandes deformaciones en el módulo plástico hasta llegar a la resistencia de estas fibras que al mismo tiempo es la resistencia máxima presentada por las probetas como un compuesto global.



Imagen 17. Comparación en el tipo de falla entre la probeta con PVA 20 mm (Izq) y la probeta con fibra de vidrio (der).

Para tener una mayor claridad en las diferencias entre los dos tipos de probetas, en la Tabla 14 se puede observar con claridad cómo actúan las fibras cuando las probetas son sometidas al ensayo de flexión a 7 días y la importancia de la adherencia entre fibra y matriz cementante para una mayor resistencia en este tipo de ensayos

<b>Resumen 7 días</b>				
	<b>LP [Mpa]</b>	<b>deformacion unitaria %.</b>	<b>MR [Mpa]</b>	<b>deformacion unitaria MR %</b>
<b>PVA-20mm 3%</b>	12,47	0,07	13,32	0,71
<b>PVA-20mm 3%</b>	12,35	0,07	12,66	0,71
<b>PVA-20mm 2%</b>	12,17	0,12	12,08	0,44
<b>PVA-20mm 2%</b>	11,85	0,11	11,90	0,38
<b>control</b>	11,71	0,58	11,71	0,12
<b>FG-12mm 3%</b>	9,39	0,07	14,06	0,23
<b>FG-36mm 3%</b>	10,09	0,09	11,01	0,53
<b>FG-12mm 2%</b>	11,30	0,05	14,95	0,19
<b>FG-36mm 2%</b>	9.74	0,06	8,75	0,34

Tabla 14. Comparación probetas con PVA-20mm y probetas con FG-12mm y FG-36mm

## 11 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 presento 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.

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 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 presento un límite de 11,71 MPa, por el contrario a los 28 días de falla se presenta 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 es decir que al emplear fibras cortas se aporta al módulo y fibras largas a la ductilidad tal como lo expresan otros autores consultados.

Si bien el módulo de rotura es medianamente alto (13.79 MPa) a 28 días, la ductilidad no es muy buena dado la aparente falla por adherencia entre las fibras y la matriz. Por lo cual para el refuerzo de este tipo de matrices, se recomienda otro tipo de fibras.



## 12 RECOMENDACIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- Evaluar la durabilidad de estos concretos para potencializar su utilización en prácticas constructivas en Colombia.
- Evaluar la relación proporcional derivada de otros tipos de fibras, mayor número de datos de prueba, diferentes contenidos de fibra, el tiempo de curado y otros factores.
- Realizar pruebas con otro tipo de probetas ya que solo se realizó el análisis en elementos delgados.
- Profundizar en la adherencia de las fibras de vidrio y su influencia en el comportamiento mecánico del concreto, comparando con otros tipos de fibra.
- Gracias a los resultados encontrados del concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibra de vidrio, pero con un mayor análisis y número de pruebas, se podría validar el uso de estas mezclas para su posterior aplicabilidad en algunos componentes estructurales como pueden ser:
  - Losas.
  - Pavimentos Industriales.
  - Elementos de fachada.
  - Revestimientos de Túneles.
  - Elementos Prefabricados.

## 13 TRAYECTORIA DE LOS INVESTIGADORES

El ingeniero Jesús Orlado Castaño Tabares (IC, Msc), ingeniero civil de la universidad del Quindío, especialización en construcción y proyectos de ingeniería civil, maestría en ingeniería del hormigón y candidato a doctor en ingeniería de la construcción y gestión ambiental en la Universidad Politécnica de Valencia. Actualmente desempeña como profesor de planta de la Pontificia Universidad Javeriana. Ha desarrollado trabajos en Materiales Alternativos de Construcción, Mecánica de Estructuras y Materiales de Construcción. Una de sus publicaciones ha sido:

- JESUS ORLANDO CASTANO TABARES, "Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete" En: Holanda  
Construction And Building Materials ISSN: 0950-0618 ed:  
v.23 fasc.7 p.2545 - 2553 ,2009

Ha participado en ponencias:

- JESUS ORLANDO CASTANO TABARES, "A study on drying shrinkage and creep of recycled concrete aggregate" En: España. 2009. *Evento*: IASS Symposium 2009 *Ponencia*: A study on drying shrinkage and creep of recycled concrete aggregate *Libro*: Evolution And Trends In Design, Analysis And Construction Of Shell And Spatial Structures. Proceedings IASS 2009., Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia, p.2955 - 2964, v. <, fasc.

Ha dirigido tesis de maestría:

- Caracterización de concretos de alto desempeño Pontificia Universidad Javeriana - Puj - Sede Bogotá Maestría en Ingeniería Civil, 2012, *Persona orientada*: Werner Adolfo Niño.
- Evaluación Técnica, Económica e Institucional de la gestión de residuos de construcción y demolición en la ciudad de Bogotá Pontificia Universidad Javeriana - Puj - Sede Bogotá Maestría en Ingeniería Civil, 2012, *Persona orientada*: Andrés Leonardo Lasso, Rodrigo Misle Rodríguez.
- Estudio del comportamiento de concretos reciclados Pontificia Universidad Javeriana - Puj - Sede Bogotá Maestría en Ingeniería Civil, 2012, *Persona orientada*: Diego Palma Cuero.

Jairo Hincapié Luna, estudiante de ingeniería civil en la Pontificia Universidad Javeriana, con énfasis en estructuras, las materias vistas y aprobadas relacionadas al énfasis son Dinámica estructural y Estructuras metálicas y durante la carrera Materiales de Construcción, diseño en concreto y laboratorio de materiales.

Christian Camilo Zambrano, también estudiante de ingeniería civil en la Pontificia Universidad Javeriana, con énfasis en estructuras, las materias vistas y aprobadas relacionadas al énfasis son Dinámica estructural y Estructuras metálicas y durante la carrera Materiales de Construcción, diseño en concreto y laboratorio de materiales.

## 14 BIBLIOGRAFÍA

- Aditivos para Concreto Premezclado. (2013). Retrieved December 5, 2013, from <http://www.basfcc.com.co/es/productos/aditivosconcreto/Pages/default.aspx>
- Agcasco. (2007, September 16). Propiedades de las Rocas de Construcción y Ornamentación.
- Allena, S., & Newton, C. (2010). Ultra-High Strength concrete mixtures using local materials
- Anne Minard. (2009, May 5). Bendable Concrete Heals Itself -- Just Add Water. Retrieved from <http://news.nationalgeographic.com/news/2009/05/090505-self-healing-concrete.html>
- Allena S. and Newton C. (2010). Ultra-High Strength Concrete Mixtures Using Local Materials, New Mexico State University, Civil Engineering Department - Concrete Sustainability Conference
- Fernando A. DIAZ. (2012, May 6). Qué es la relación agua cemento y cómo influye en la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del hormigón?
- Association Francaise de Genie Civil. (2002). Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes.
- Choisy, Auguste, & col. (1999). *El arte de construir en Roma* (Vol. reverté).
- Chunxiang, Q., & Patnaikuni, I. (1999). Properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete beams in bending, 21(1), 73 – 81.
- De Larrard, F. (1999). *Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach*.

*Modern Concrete Technology Series* (Vol. 9). London: E&FN.

Durán, Das Roy & Rivera. (2005). Desarrollo de concretos de ultra-alto comportamiento, ciencia UANL/ Vol. VIII, No. 1, ENERO-MARZO 2005.

Engineered composites. (2007). A brief introduction to ECC and ECC technology network. Retrieved from Engineeredcomposites.com

E. Fehling; K. Bunje; T. Leutbecher 2004 “Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete”. “Proceeding of the International Symposium on ultra-high performance Concrete Kassel, Germany”, 2004. Pp.377-390.

Fernández Luco. (2009). *Importancia del curado en la calidad del hormigón de recubrimiento. Parte I: Análisis teórico de los efectos del secado prematuro.*

Gabriel Campos. (2010). ¿Qué es mortero y cómo funciona? *Calidra*. Retrieved March 9, 2014, from <http://calidra.com/usodelacal/mortero/>

Garas, V., Kurtis, K., & Kahn, L. (2011). Creep of UHPC in tension and compression: Effect of thermal treatment.

H.A. Abdalla. (2002). Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars. *April 2002, volume 56*, 63–71.  
doi:10.1016

Henry G. Russell, & Jaime Moreno. (1997). - State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete Reported by ACI Committee 363. 1997.

Heyman, Jacques. (2001). *La ciencia de las estructuras*. Madrid.

Ibrahim M. Metwally. (2008). *Composite Structures* (Vol. volumen 86).

James E. Cook. (1989). 10,000 psi concrete. *Concrete International*, 11, 67–75.

- Jesus David Osorio. (2013). El Concreto Reforzado con fibras de Vidrio.
- Jose A dias, alejandro camacho, kevin martinez navarrete, & javier wong campos. (2011). *resistencia a la compresion en el cemento hidraulico*. Retrieved from [http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/file/3125978/PP\\_INFORME\\_%233.pdf](http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/file/3125978/PP_INFORME_%233.pdf)
- Li M. (2012). Rheology, Fiber Dispersion, and Robust Properties of Engineered Cementitious Composites. *Materials and Structures*, 46, 405–412.
- Lucía Garín, Adrián Santilli, & Eduardo Pejoja. (2012). *Influencia del curado en la resistencia a compresión del hormigón: estudio experimental* (Vol. 1).
- M.D. Lepech. (2008). Large scale processing of Engineered Cementitious Composite. *ACI Materials Journal*, 105, 358–366.
- Majundar, A. J, & Laws, V. (1967). Glass Fibre Reinforced Cement.
- Manual Forton: Ciment Renforce de Fibras de verre. (2010).
- Markovic, I. (2006). *High-Performance Hybrid-Fiber Concrete* (PhD). Technical University of Delft, The Netherlands.
- Lawrence T. Drzal (1999). Interfaces and Interphases, Michigan State University
- Li M. (2011). mechanics to structural engineering - The design of cementitious composites for civil engineering applications.
- Mohamed S. Issa, Ibrahim M. Metwally, Sherif M. Elzeiny. (2011). Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars. *May 2011, volume 33*.
- Natalia Alderete. (2010). *Ensayo a Flexión de Vigas de Hormigón con Incorporación de Agregados Reciclados* (LEMaC Centro de Investigación Vial.).

O. Bayard and Ple, O. (2003), "Fracture mechanics of reactive powder concrete: material modelling and experimental investigations", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.70, pp. 839–851.

O. Millon, W. Riedel, K. Thoma, E. Fehling and M. No"ldgen (2009). Fiber-reinforced ultra-high performance concrete under tensile loads, Fraunhofer Institute for High-Speed Dynamics, EMI, 79104 Freiburg, Germany.

P. I. Comino, J.C. Romero, & Saint Gobain Vetrotex. (2007). *El GRC Material Compuesto de Matriz Cementicia reforzado Con fibra de Vidrio AR.*

Peter J. Seibert, & Vic H. Perry. (2013). *The use of UHPFRC (Ductal®) for bridges in North America: The technology, applications and challenges facing commercialization.*

Redaa, M.M., Shrivea, G.N. and Gillotta, E.J (1999) "Microstructural investigation of innovative UHPC", *Cement and Concrete Research*, Volume 29, Issue 3, pp. 323–329.

Shackelford. (2001). *Introducción a la Ciencia de los Materiales para Ingenieros.*

Sockalingam S. & Nilakantan G. (2012). Fiber-Matrix Interface Characterization through the Microbond Test, *Int'l J. of Aeronautical & Space Sci.* 13(3), 282–295.

Sumiglas S.A. *Fibra de Vidrio Fibra de Vidrio Medellin.* (2013). Retrieved November 15, 2013, from <http://www.sumiglas.com/>

Tejero Juez, Enrique. (1987). *Hormigón Armado* (Colegio Oficial de Arquitectos de Aragón.).

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*.

William D callister. (1997). *introducción a la ciencia ingeniera de los materiales* (1 edición.). Barcelona: editorial reverté.

Yang, H., Joh, C., & Kim, B. (2010a). Structural behavior of ultra high performance concrete beams subjected to bending. *ELSEVIER*, 1 – 9.

Yeol Choi, & Robert L. Yuan. (2004). Experimental relationship between splitting tensile strength and compressive strength of GFRC and PFRC.

Rendón, C., Li, V., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T., & Ogawa, A. (2001). Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix. *Materials in civil engineering*, 13(6), 399-406.

Franco, E., Delvasto, S., Zuluaga, F., & Amigó, V. (2013). Morphological and mechanical response characterization of nanofiber aggregates of PVA produced by electrospinning sol-gel process. *DYNNA*, 80(178), 109-114.

Wang, S., & Li, V. (2003). Tailoring of PVA Fiber/Matrix Interface for Engineered Cementitious Composites (ECC).

Wang, S., & Li, V. (2006). Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances.

Weimann, M., & Li, V. (2003). Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC). *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments*, 9(5), 513-534.



Eric W. Weisstein (2007). The Fraunhofer Diffraction, ScienceWorld. Wolfram Research.