

# MODIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN AL SER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO AR



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Máster en Ciencia y Tecnología de Materiales

**Autor: SANDRA VILLAMUDRIA RIVERA**

**Tutor: JAIME AURELIO VIÑA OLAY**

**Fecha de presentación: 11/07/2014**

# ÍNDICE

---

1.- INTRODUCCIÓN	1
1.1- ANÁLISIS PREVIO	1
1.2- OBJETIVOS	3
1.2.1- OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2.- FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1- HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS	5
2.1.1- REFUERZOS MEDIANTE FIBRAS	6
2.2- FIBRA DE VIDRIO	7
2.2.1- FABRICACIÓN	7
2.2.2- TIPOS DE FIBRAS DE VIDRIO Y PROPIEDADES	8
2.2.3- FIBRA DE VIDRIO AR PARA HORMIGONES	9
2.3- FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO	10
2.3.1- PROCESOS DE PREMEZCLA	10
2.3.2- PROCESOS DE PROYECCIÓN SIMULTÁNEA	11
2.4- COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO	12
2.5- ANTECEDENTES	13
2.5.1- ENSAYO DE GRC CON FIBRA DE VIDRIO AR	13
2.5.2- ENSAYOS DE FLEXIÓN, COMPRESIÓN Y RETRACCIÓN DE GRC CON FIBRA DE VIDRIO E CON NUEVOS RECUBRIEMIENTOS	15
2.5.3- ENSAYOS SOBRE GRC CON FIBRA DE VIDRIO AR FRENTE A IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD	15
2.5.4- ENSAYO A FATIGA EN FLEXIÓN EN HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO	16

2.5.5- PRPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN REFORZADO	
CON FIBRA DE VIDRIO AR_____	17
2.5.6- RENDIMIENTO CON BARRAS DE PLÁSTICO REFORZADAS	
CON FIBRA DE VIDRIO COMO MATERIAL DE REFUERZO	
PARA ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN_____	17
2.5.7- COMPOSITES DE FIBRA DE VIDRIO DE BAJO COSTE CON	
MAYOR RESISTENCIA A LOS ÁLCALIS ADAPTADOS PARA	
EL REFUERZO_____	18
3.- DESARROLLO EXPERIMENTAL_____	20
3.1- MATERIALES Y COMPONENTES_____	20
3.1.1- CEMENTO_____	21
3.1.2- ÁRIDOS_____	22
3.1.3- AGUA_____	23
3.1.4- FIBRA DE VIDRIO AR_____	23
3.2- DOSIFICACIÓN_____	25
3.3- TRATAMIENTO DE PROBETAS_____	28
3.3.1- REFRENTADO DE PROBETAS CILÍNDRICAS_____	29
3.3.2- REALIZACIÓN DE ENTALLA EN PROBETAS PRISMÁTICAS____	31
3.4- ENSAYOS_____	34
3.4.1- ENSAYO DE COMPRESIÓN_____	35
3.4.2- ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS_____	37
3.4.3- ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA_____	38
3.4.4- ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA_____	41
3.4.5- ENSAYO DE ULTRASONIDOS_____	43
3.4.6- ENSAYO DE CONSISTENCIA_____	44
3.4.7- ENSAYO DE AIRE OCLUIDO_____	46
4.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN_____	47

4.1- ENSAYO DE COMPRESIÓN	47
4.2- ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS	49
4.3- ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA	51
4.4- ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA	52
4.5- ENSAYO DE ULTRASONIDOS	54
4.6- ENSAYO DE CONSISTENCIA	56
4.7- ENSAYO DE AIRE OCLUIDO	57
5.- INCIDENCIAS	58
6.- CONCLUSIONES	61
6.1- CONCLUSIÓN GENERAL	61
6.2- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	61
7.- PROPUESTA EN INVESTIGACIONES FUTURAS	63
8.- BIBLIOGRAFÍA	64

## 1- INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material muy resistente a compresión pero con muy baja resistencia a tracción. Por este motivo resulta necesario reforzar el hormigón con algún material que presente unas cualidades específicas capaces de mejorar las prestaciones que posee el hormigón por su naturaleza. Normalmente el hormigón se ha reforzado con acero, ya sea en fibras o barras, pero se continúa investigando sobre posibles materiales que también pueden mejorar el comportamiento mecánico del hormigón. Uno de estos refuerzos puede ser la fibra de vidrio, material no tan costoso que ha demostrado reforzando otros materiales como los polímeros, un importante aporte en el mejoramiento de sus propiedades mecánicas. En anteriores investigaciones en las que se ha reforzado el hormigón con fibra de vidrio se ha observado que la fibra se deteriora por los álcalis presentes en el hormigón, por lo que sería necesario utilizar una fibra que sea resistente a estos componentes. Este es el principal alcance del presente trabajo donde se fabricarán materiales compuestos con fibra de vidrio resistente a los álcalis reforzando hormigón con distintas dosificaciones en  $\text{Kg/m}^3$  y con diferentes longitudes de fibra, evaluando luego sus principales propiedades mecánicas.

El trabajo se realiza en la Universidad de Oviedo, los ensayos se han realizado en los laboratorios de la Universidad ubicados en el Campus de Gijón, así mismo la elaboración de las distintas amasadas del hormigón. La empresa FIBRATEC ha sido la encargada en el suministro de la fibra de vidrio.

El estudio comienza en Diciembre de 2013 y se prolonga durante los primeros seis meses de 2014, hasta junio, mes en el que se acabaron todos los ensayos.

Este trabajo recopila todos los resultados obtenidos de los ensayos, los analiza, los estudia y se definen las conclusiones correspondientes.

### 1.1- ANÁLISIS PREVIO

Se cree que el hormigón reforzado con fibra de vidrio comenzó a usarse en Rusia en la década de 1940 con el fin de reducir el espesor de las piezas de hormigón y utilizarlas en cerramientos de fachadas. También existe otra teoría que comenta que se empezó a usar con el fin de ahorrar acero para la industria bélica durante la segunda guerra mundial.

El hormigón reforzado con fibra de vidrio es un “composite” o material compuesto: las fibras de vidrio se proyectan sobre una base de mortero de cemento en varias capas, creando un material final que reúne las cualidades de ambos, mejorándose las propiedades mecánicas del conjunto. Debido a que la finalidad de las piezas de hormigón reforzado con fibra de vidrio es habitualmente la creación de paneles de cara vista como el que se presenta en la Fig. 1. El presente trabajo tiene por objeto el llevar más allá el uso de dicho composite y por lo tanto analizar su comportamiento. La fibra de vidrio de naturaleza ácida reacciona con los álcalis del hormigón, por lo que se prefiere emplear un hormigón de baja alcalinidad y/o utilizar para reforzarlo un tipo de fibra de vidrio que sea resistente a los álcalis, como es el caso de la fibra a emplearse en el presente trabajo.



**Fig. 1.** Paneles sándwich de hormigón reforzado con FV en Biblioteca Lope de Vega de Tres Cantos, Madrid

## **1.2- OBJETIVOS**

### **1.2.1- OBJETIVO GENERAL**

Cuantificar experimentalmente el comportamiento mecánico de un hormigón reforzado con fibra de vidrio resistente a los álcalis (AR).

### **1.2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

En el presente trabajo se estudiarán las variaciones que puedan presentarse en las propiedades mecánicas del hormigón cuando se refuerza con fibra de vidrio resistente a los álcalis (AR), con tres diferentes dosificaciones en  $\text{kg/m}^3$  y con tres diferentes longitudes de fibras, estableciéndose comparaciones entre las distintas combinaciones dosificación-longitud de la fibra, y entre cada una de esas combinaciones con el hormigón sin reforzar, buscándose en la experimentación cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Calcular, mediante ensayo, la carga máxima a rotura y la resistencia a compresión, del composite, según la norma correspondiente.
- Definir la carga máxima de rotura a flexión. Dentro de este apartado también se calculará la flecha que experimenta la probeta durante el ensayo, el límite de proporcionalidad y la resistencia residual.
- Establecer la penetración de agua máxima y media tras haber sometido probetas normalizadas de las distintas combinaciones dosificación-longitud de fibra estudiadas a agua a presión de cinco (5) bares durante unas setenta y dos (72) horas.
- Establecer la resistencia y la carga máxima de rotura que experimenta el hormigón reforzado con fibra de vidrio tipo AR mediante un ensayo de tracción indirecta.
- Someter las combinaciones de composite fabricadas a ensayos de ultrasonidos con el fin de obtener el tiempo de recorrido de una onda ultrasónica dentro de la probeta, valor que está íntimamente relacionado de manera directa con los parámetros elásticos del material e indirectamente con las propiedades de resistencia.

- Obtener la consistencia del hormigón fresco una vez terminada la elaboración de cada amasada, mediante el método de cono de Abrams. La consistencia es la mayor o menor facilidad que presenta el hormigón en estado fresco a deformarse y como consecuencia de esta propiedad, de ocupar todos los huecos del encofrado o molde donde se vierte.
  
- Calcular el aire ocluido a fin de obtener la variabilidad que presenta el hormigón con fibra de vidrio AR a la deformación elástica que experimenta éste en estado fresco bajo una presión dada y en condiciones definidas, y comparar esta deformación con la de un volumen conocido de aire sometido a la misma presión.



## 2- FUNDAMENTO TEÓRICO

### 2.1- HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Los materiales compuestos por una matriz de cementícea son materiales frágiles y con una gran resistencia a compresión. El hormigón es el material estructural empleado por excelencia en la construcción. Tiene como característica principal la resistencia a esfuerzos de compresión, pero no tiene resistencia frente a otro tipo de esfuerzos, como son los de tracción y flexión. Por este motivo surge la necesidad de combinar este material con otro para mejorar las deficiencias que presenta el hormigón. Inicialmente el material escogido para este refuerzo era metálico. Sin embargo a medida que se ha ido investigando, otros tipos de refuerzo han cobrado también una importancia relevante, como pueden ser las fibras. Un reforzamiento mediante fibras puede ofrecer un conveniente, práctico y económico método para superar esas deficiencias.

Creando un material compuesto o composite, que son aquellos que se obtienen mediante la unión de diferentes materiales, los cuales de forma individual presentan inferiores características mecánicas, físicas o químicas de las que presenta el conjunto del material compuesto. Es pues el material compuesto un elemento fabricado expresamente para mejorar los valores de las propiedades que los materiales constituyentes presentan por separado

Resulta conveniente establecer qué se entiende por hormigones reforzados con fibras. Como referencia, se utiliza la “Instrucción Española de Hormigón Estructural” que es la normativa que regula el cálculo y la seguridad en estructuras de hormigón. Según el Anejo 14 de esta Norma (EHE-08)”, titulado: “Hormigón reforzado con fibras (HRF)”, se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. También establece que esta adición es admisible en hormigones en masa, pretensados y armado. Esta norma define como fibras ‘aquellos elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas’, estableciendo según su naturaleza una clasificación:

- Fibras de acero: fabricadas con materiales metálicos.
- Fibras poliméricas: realizadas a partir de materiales plásticos

- Otras fibras inorgánicas: como son las fibras de vidrio, las cuales han sido usadas en este trabajo.

Los materiales compuestos generados por las fibras de vidrio, son ampliamente conocidos en el mercado mundial con el nombre de GFRC (Glass Fibre Reinforced Composite). Éste es pues un material en el cual su matriz resistente es un mortero de cemento armada con fibras de vidrio las cuales son resistentes a los álcalis liberados con la hidratación del cemento.

### **2.1.1- REFUERZOS MEDIANTE FIBRAS**

El gran desarrollo impulsado en la tecnología del hormigón se ha servido del uso de fibras de distintos materiales (metálicos, vítreos y sintéticos) que incrementan en gran medida la resistencia del material, aportándole una mayor tenacidad y mejorando su comportamiento mecánico.

La incorporación de fibras sintéticas permite a los hormigones mayores prestaciones, aumentando su módulo de elasticidad con estructuras más ligeras y mejorando su resistencia a la tracción. Con ello se previenen posibles fisuras y se aumenta la resistencia frente a los impactos.

Existen diferentes tipos de fibras para reforzar hormigones:

- **FIBRAS DE ACERO**

Las fibras de acero pueden clasificarse según su proceso de fabricación (virutas de acero, fibras de acero fundidas, fibras trefiladas, fibras cortadas en láminas) o según su forma (fibras rectas, fibras corrugadas, fibras onduladas, fibras conformadas). La forma de las fibras es muy importante para mejorar la adherencia con el hormigón.

- **FIBRAS POLIMÉRICAS**

Estas fibras sintéticas están formadas por diferentes materiales poliméricos extrusionados y luego cortados, como pueden ser polipropileno, polietileno de alta densidad, alcohol de polivinilo, aramida, poliamida, poliéster. Las fibras poliméricas pueden clasificarse según su fabricación (monofilamentos extruidos o láminas

fibriladas) o según su diámetro (microfibras o macrofibras, en función de si su diámetro es menor o mayor a 0.30 mm, respectivamente).

- **FIBRA DE VIDRIO**

Las fibras de vidrio se emplean con muy buenos resultados en medios alcalinos por su elevada resistencia a los álcalis. Tienen muchas aplicaciones que van desde paneles construidos con hormigón proyectado a prefabricados estructurales diversos.

Las fibras de vidrio en el hormigón pueden generar reducciones notables en la resistencia y tenacidad del material cuando son expuestas al medio ambiente, debe protegerse tanto la fibra como su matriz cementosa. Al proteger las fibras en forma superficial con un producto epoxídico, se consigue reducir la fragilidad de este compuesto.

## **2.2- FIBRA DE VIDRIO**

La fibra de vidrio es un material fibroso obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos (espinerette) que al solidificarse tiene suficiente flexibilidad como para ser usado como fibra (ver Fig. 2).

Sus principales propiedades son buen aislamiento térmico, inerte ante ácidos y que soporta altas temperaturas. Estas propiedades y el bajo precio de sus materias primas, le han dado popularidad en muchas aplicaciones industriales.



**Fig. 2.** Fibras de vidrio vistas a través de un microscopio electrónico de barrido

### **2.2.1- FABRICACIÓN**

Hay dos métodos principales de fabricación de fibra de vidrio y dos tipos principales de productos de fibra de vidrio. La fibra se puede hacer por un proceso de

fusión directa o por un proceso de refundición. Ambos comienzan con las materias primas en estado sólido. Los materiales se mezclan y se funden en un horno. Entonces, para el proceso de refundición, el material fundido es cortado y enrollado en bolitas, que son enfriados y envasados. Estas canicas son llevadas a las instalaciones de fabricación de fibra en el que se insertan en un cilindro y el material es refundido. El vidrio fundido se extruye a través de un cabezal con boquillas, denominado bushing, que lo conforma en filamentos. En el proceso de fusión directa, el vidrio fundido del horno va directamente al buje de conformación

### 2.2.2- TIPOS DE FIBRAS DE VIDRIO Y PROPIEDADES

- **Vidrio E**

Desde 1930, la fibra de vidrio ha sido considerada uno de los materiales del futuro debido a sus cualidades dieléctricas: el aislamiento de conductores eléctricos sometidos a temperaturas altas era ofrecido por los filamentos de vidrio E. Usado solo o en asociación con barniz o resinas sintéticas, fue su primera aplicación industrial en gran escala. La fibra de vidrio E es el tipo más comúnmente usado, tanto en la industria textil, como en compuestos donde responde por el 90% de los refuerzos usados.

- **Vidrio R**

Este tipo de filamento fue creado a pedido por los sectores de aviación, espacio y armamentos. Satisface las exigencias de ellos en términos de comportamiento de materiales en relación a fatiga, temperatura y humedad. Debido a su alto desempeño técnico puede ser utilizado para reforzar láminas de rotor de helicópteros, pisos de aviones, tanques de combustible de aviones, proyectiles y lanzadores de proyectiles. Desarrollado principalmente para estas aplicaciones, también se encontró otras salidas, por ejemplo, en la industria del deporte, ocio, transporte y blindaje balístico.

- **Vidrio D**

Compuestos a partir de vidrio D tienen muy bajas pérdidas eléctricas y son usados como un material que es permeable a ondas electromagnéticas, con beneficios muy

importantes en términos de características eléctricas. La fibra de vidrio D es usada en la fabricación de ventanas electromagnéticas y superficies de circuitos impresos de alto rendimiento.

- **Vidrio C**

El vidrio C es usado para la producción de vidrio resistente a la corrosión (como capa externa anticorrosiva de tubos y para superficies de tubos compuestos).

- **Vidrio AR**

El vidrio AR fue desarrollado especialmente para el refuerzo de morteros y hormigones. Su alto contenido de óxido de zirconio ofrece una resistencia excelente para compuestos alcalinos. El refuerzo con filamento de vidrio AR da mejores resultados de roturas, con buena durabilidad. Esto significa que las piezas fabricadas con hormigón reforzado con estas fibras, pueden tener un peso menor. Aplicaciones principales son: sustitución del amianto, paneles prefabricados y otros materiales de construcción limitándose en esta industria a usos no estructurales, debido a que aún no se ha evitado completamente la pérdida de propiedades con el paso del tiempo.

### **2.2.3- FIBRA DE VIDRIO AR PARA HORMIGONES <sup>111</sup>**

Los primeros hormigones reforzados con fibras se hicieron con asbesto. El material resultante fue llamado “asbestocemento”, este composite presentaba grandes ventajas de costo y trabajabilidad, pero hoy está prohibido por las enfermedades mortales que provoca.

Se continuó la búsqueda de un refuerzo que permitiera la consecución de un material compuesto, con excelentes prestaciones. Se han desarrollado numerosas experiencias con otras fibras de refuerzo, tales como, las de origen orgánico (aramidas, nylon, rayon, polipropileno), inorgánico (vidrio, boro, carbono) y metálicos (hierro, fundición dúctil, acero, Ni, Ti, Al). De entre todas ellas la mejor relación precio-propiedades mecánicas la ostentan las fibras de vidrio. Los primeros ensayos y experiencias para el refuerzo de los cementos y sus morteros se realizaron con fibras de vidrio tipo “E”, dada la alta resistencia propia de las mismas. Sin embargo, fracasaron

debido a que, este tipo de fibra de vidrio, al ser incorporada al mortero, estaba sujeto al ataque químico de los álcalis producidos en el proceso de hidratación del cemento, lo cual producía un deterioro de la fibra, afectando con el tiempo a las propiedades mecánicas del mortero reforzado.

En 1967 el Dr A.J. Majundar, del Building Research Establishment (BRE) del Reino Unido, empezó a investigar los vidrios que contenían circonio, logrando convertir en fibra alguno de ellos y demostrando la resistencia que presentaban estas fibras ante el ataque alcalino en un medio agresivo como el que suponía el refuerzo de los cementos Portland. Tras cuatro años de continuas investigaciones, el refuerzo para los cementos se logró hacerlas totalmente resistente a los álcalis y 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 denominada AR-Glassfibre, o fibra de vidrio AR (de Alkali-Resistant). Siendo por lo tanto, este tipo de fibra la que debe usarse en la elaboración de materiales compuestos de hormigón reforzado con fibras de vidrio.

## **2.3- FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO <sup>[2]</sup>**

Existen diferentes procesos para la fabricación de un GRC. Se debe tener en cuenta que procesos distintos y/o híbridos a los presentados pueden utilizarse para la fabricación de piezas específicas.

### **2.3.1- PROCESOS DE PREMEZCLA**

En el proceso de premezcla, el refuerzo de la fibra de vidrio actúa de forma tridimensional, pues las fibras se orientan en las tres direcciones.

Todos los procesos de premezcla tienen en común el acto del mezclado, que normalmente se efectúa en una hormigonera o en un amasador simple de paletas. Es importante la utilización de fibras que, presenten una perfecta incorporación y se pueden mezclar dentro de un mortero sin que se produzcan apelonamientos o problemas de homogeneización.

El proceso de premezcla consta, normalmente, de dos etapas. En la primera se mezclan y amasan los componentes del mortero y se adicionan las fibras de vidrio, y en la segunda se aplica la mezcla al molde (o en su caso a la realización de la obra in-situ, como por ejemplo, en la realización de revocos, soleras, etc.).

Por lo general, las resistencias obtenidas con los procesos de premezcla son inferiores a las obtenidas por proceso de Proyección Simultánea, que procede a explicarse a continuación.

### 2.3.2- PROCESOS DE PROYECCIÓN SIMULTÁNEA

La proyección simultánea es un proceso de fabricación mediante el cual se obtienen piezas de GRC reforzadas de forma bidireccional (en el plano). La fabricación consistirá en la proyección de capas que posteriormente se irán compactando entre sí hasta formar el espesor total de la lámina o panel de GRC (normalmente entre 10 y 15 mm).

Dentro de este proceso de fabricación del GRC se incluye:

- Proyección Simultánea Manual: Un operario es el encargado de proyectar las capas, mediante una pistola de proyección (ver Fig. 3) Se utiliza para la fabricación de paneles de cerramiento de gran tamaño o de otro tipo de elementos de construcción que requieren una elevada resistencia.



**Fig. 3.** Proyección manual de fibras mediante pistola

- **Proyección Simultánea Automática:** La pistola de proyección realiza un movimiento de vaivén transversal sobre unos moldes que van pasando por debajo. Este método se emplea con productos planos como los encofrados perdidos de puentes, o para componentes que pueden post-formarse con una técnica de molde plegado, tales como conductos de cables.
- **Proyección Simultánea Robotizada:** Las máquinas son controladas por ordenador, siendo capaces de proyectar a intensidades de hasta 35 kg/min. Se pueden memorizar los perfiles para repetirlos con exactitud. El ordenador controla la velocidad de la cinta transportadora, la velocidad de bombeo de mortero y los dispositivos de control de circulación del agua.

## **2.4- COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO <sup>[2]</sup>**

En la Fig. 4 que se muestra a continuación, pueden verse los niveles de resistencia adquiridos por un GRC después de un curado de veintiocho (28) días en una cámara cerrada con temperatura y humedad relativa fijas, fabricado tanto por el método de proyección como por el de premezcla, además se compara con un mortero que no contiene refuerzo de fibra de vidrio. Todos los valores corresponden a placas de espesor de 10 mm, fabricados con un tipo de fibra de vidrio álcali-resistente denominada “Cem-FIL”, fibra muy usada y muy conocida en un amplio ámbito internacional.



<i>Propiedades</i>	<i>Proyección</i>	<i>Premezcla</i>	<i>Mortero Común</i>
<b>Fibra Cem-FIL (% en peso)</b>	5	3	0
<b>Flexión</b>			
<b>Módulo de Rotura (MPa)</b>	20 – 30	10 – 14	5 – 12
<b>Límite Elástico (MPa)</b>	7 – 11	5 – 8	3 – 6
<b>Tracción</b>			
<b>Módulo de Rotura (MPa)</b>	8 – 11	4 – 7	3 – 5
<b>Límite Elástico (MPa)</b>	5 – 7	4 – 6	3 – 5
<b>Resistencia a la Compresión (MPa)</b>	50 – 80	40 – 60	20 – 50
<b>Resistencia al Choque (Kj/m<sup>2</sup>)</b>	10 – 25	10 – 15	5 – 10
<b>Módulo de Elasticidad (GPa)</b>	10 – 20	10 – 20	9 – 15
<b>Deformación a la Rotura (%)</b>	0.6 – 1.2	0.1 – 0.2	0.1 – 0.2
<b>Densidad del Material (g/cm<sup>3</sup>)</b>	1.9 – 2.1	1.8 – 2.0	1.7 – 2.1

**Fig. 4.** Propiedades mecánicas de placas de hormigón de 10mm de espesor reforzadas con fibras de vidrio “Cem-FIL” según su fabricación

La figura ha sido obtenida de estudios anteriores realizados con hormigón reforzado con fibra de vidrio. En ella puede observarse la notable mejora que presentan las placas de GRC cuando se les añade un porcentaje en peso de fibras.

## 2.5- ANTECEDENTES

En este apartado se exponen una serie de ensayos realizados por varios autores sobre hormigones reforzados con fibras de vidrio.

### 2.5.1- ENSAYOS DE GRC CON FIBRA DE VIDRIO AR

Diversos han sido los autores de investigaciones <sup>[3 y 4]</sup> en los ensayos realizados al composite hormigón con fibra de vidrio AR. La mayoría focalizaron sus investigaciones en torno a dos sollicitaciones de esfuerzo concretas:

- TRACCIÓN <sup>[3]</sup>

Inicialmente se ensayan composites con otros tipos de fibras, pero vieron que los refuerzos se deterioraban en un periodo muy corto de tiempo por lo que se perdían rápidamente las mejoras que éstas proporcionaban en la ductilidad y en la resistencia a tracción. Se procedió entonces a la utilización de fibras resistentes a la alcalinidad presente en el hormigón. Las fibras mantenían sus propiedades durante un intervalo más largo de tiempo, pero a pesar de esto, los efectos del paso del tiempo en el comportamiento del compuesto se siguieron manifestando. Al ver todos estos problemas, se intentó solucionar mediante la adición de productos químicos a la pasta de cemento. Los aditivos usados fueron humo de sílice, metacaolín, cenizas volantes y resinas acrílicas.

Los resultados que se obtuvieron mostraban grandes dispersiones en función de las adiciones empleadas y las proporciones en las que estas se incluían en las formulaciones. Se realizaron ensayos de tracción sobre GRC fabricado sin adiciones, y con humo de sílice, metacaolín y resinas acrílicas para comprobar la influencia de estos aditivos tanto en el material joven como en el envejecido.

Los ensayos arrojaron una serie de conclusiones que decían:

- La adición de metacaolín conserva moderadamente la ductilidad a medio plazo.
- Se produce una fragilización del material para todas las formulaciones estudiadas.
- Después de 80 días de envejecimiento el GRC es un material elástico y lineal hasta rotura para cualquier formulación.
- La mayor degradación del compuesto se produce en los primeros once años de vida.

- FLEXIÓN <sup>[4]</sup>

De los ensayos de tracción expuestos anteriormente, se dedujo que la validez del ensayo dependía principalmente de las variaciones de espesor de las probetas, dado que las fracturas se localizaban donde el espesor era menor, debido a defectos de fabricación. Los ensayos de flexión en cuatro puntos eran menos sensibles a las variaciones del

espesor de las muestras, por lo que se realizó la caracterización del GRC mediante estos ensayos.

Se llevaron a cabo los ensayos de flexión sobre las probetas de GRC fabricadas con metacaolín, introducido en el material en porcentaje del 25% respecto del peso del cemento.

Los resultados reflejaron unos valores inferiores del módulo de rotura en las probetas que habían sido envejecidas. La ductilidad también fue menor.

### **2.5.2- ENSAYOS DE FLEXIÓN, COMPRESIÓN Y RETRACCIÓN DE GRC CON FIBRA DE VIDRIO E CON NUEVOS RECUBRIMIENTOS <sup>[5]</sup>**

El empleo de fibras de vidrio como refuerzo en los hormigones se usa frecuentemente en el mundo de la construcción. Sin embargo, como ya se ha mencionado anteriormente, el empleo de fibras de tipo E o A no es aconsejable ya que se corroen rápidamente por el alto pH del hormigón.

Dos fueron las soluciones por las que se podía optar para evitar este deterioro, una primera, fue fabricar fibras con un alto contenido en circonio, pero era muy difícil y caro. La segunda opción fue someter a las fibras a un tratamiento superficial para mejorar la resistencia a los álcalis. El estudio se realizó usando fibras E con un recubrimiento  $15\text{CaO}-15\text{BaO}-20\text{SiO}_2-50\text{TiO}_2$ . El ensayo incluyó ensayos de flexión, compresión y retracción.

El resultado reveló que las fibras recubiertas pueden mejorar la resistencia a los álcalis que la fibra de vidrio original y mejorar la ductilidad del GRC.

### **2.5.3- ENSAYOS SOBRE GRC CON FIBRA AR FRENTE A IMPACTO A ALTA VELOCIDAD <sup>[3]</sup>**

La caracterización del GRC frente a cargas dinámicas tiene una gran importancia puesto que este era un aspecto del material poco estudiado. Para caracterizar el

comportamiento del GRC cuando está sometido a velocidades de deformación altas se realizaron ensayos con el cañón de gas, el cual, disparó proyectiles esféricos de acero.

Los resultados reflejaron que la influencia de las adiciones, en el comportamiento del GRC cuando se le somete a impactos a altas velocidades, fue despreciable. Todas las formulaciones de GRC fueron capaces de absorber energías similares en los ensayos. La perforación del material fue total, el GRC no absorbió más energía cuando la velocidad de impacto aumentó. Así mismo se concluyó que la energía que absorbe el GRC es independiente de la edad del mismo.

#### **2.5.4- ENSAYO A FATIGA EN FLEXIÓN EN HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO <sup>[6]</sup>**

En este estudio publicado en Procedia Engineering, se redacta que se ensayaron sesenta y tres (63) probetas de hormigón reforzado con fibra de vidrio a flexión en cuatro puntos sometidos a fatiga en una máquina de ensayo universal ferrohídrica (MTS) para obtener los niveles de fatiga durante la vida del composite en varios rangos de presión. Las probetas contenían diferentes porcentajes de refuerzo de fibra de vidrio, 0.6%, 0.8% y 1.0%, fracción en peso del hormigón. Los coeficientes de la ecuación de la fatiga se determinaron correspondientes a diferentes probabilidades de supervivencia así como para predecir la resistencia a la fatiga por flexión de GFRC para el nivel deseado de la probabilidad de supervivencia.

Las conclusiones establecidas en este estudio reflejaron que la distribución estadística de la fatiga de vida del hormigón reforzado con fibra de vidrio a un dado nivel de presión, seguía aproximadamente la distribución de Weibull de dos parámetros. Estos dos parámetros se obtuvieron de manera gráfica. Los coeficientes de la ecuación de fatiga se determinaron para el composite correspondientes a diferentes probabilidades de supervivencia, motivo por el cual se incorporó las probabilidades de supervivencia en la ecuación de la fatiga. La ecuación de la fatiga se utilizó para la obtención de la resistencia a la fatiga a la flexión del hormigón reforzado con fibra de vidrio para el nivel deseado de probabilidad de supervivencia. Como un todo, el comportamiento a la fatiga de composite fue mejor que la del hormigón en masa.

### **2.5.5- PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO <sup>[7]</sup>**

En este estudio se desarrolló una comprensión cuantitativa de la conducta de fibra de vidrio reforzando hormigones, que se pueden utilizar para fabricación de nuevos elementos estructurales o para el fortalecimiento de estructuras de hormigón existentes.

El documento informó sobre las pruebas realizadas para establecer la influencia de la presencia de fibras de vidrio en las propiedades mecánicas y reológicas del hormigón utilizando un aglutinante de cemento de fosfato. Se estudiaron dos matrices cerámicas concretas diferentes, que contienen arena o áridos ligeros de arcilla expandida.

Se examinaron fracciones de volumen de fibra entre 0% y 2%. La adición de fibras de vidrio en el hormigón tenía poca influencia en la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, pero dio como resultado aumentos significativos en la resistencia a la flexión y resistencia a la cizalladura directa, independientemente del tipo de matriz o longitud de la fibra. Los resultados también mostraron que la compresión, la flexión y la tenacidad a la cizalladura aumentaron con un aumento en el contenido de fibra, mientras que la facilidad de trabajo disminuyó.

En general, los resultados indicaron que hormigones reforzados con fibra de vidrio pueden producir una trabajabilidad y unas propiedades mecánicas que se consideran adecuados para su aplicación en elementos de construcción.

### **2.5.6- RENDIMIENTO DE BARRAS DE PLÁSTICO REFORZADAS DE FIBRA DE VIDRIO COMO MATERIAL DE REFUERZO PARA ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN <sup>[8]</sup>**

Otro de los antecedentes, aunque no estrictamente ligado en la misma dirección de estudio, es el refuerzo de polímeros con fibra de vidrio. Estos polímeros son fabricados en forma de barras y posteriormente utilizados como refuerzo de hormigón en sustitución del acero.

Este estudio se realizó por la creciente necesidad de establecer un nuevo código de diseño o de adoptar las características mecánicas de polímeros reforzados con fibras.

El artículo sugirió algunas modificaciones al modelo de ACI que se utilizaba en el año 2000 para el cálculo de resistencia a la flexión, el servicio de carga deformación, y el refuerzo mínimo necesario para evitar la rotura de la armadura de tracción.

Se realizaron dos series de pruebas para comprobar la validez de las modificaciones sugeridas. La primera serie se utiliza para comprobar la validez de las modificaciones introducidas en los modelos de resistencia a flexión y de la carga de servicio. También se analizaron los resultados de las pruebas de la primera serie para desarrollar dos modelos simples para el cálculo de flexión bajo carga de servicio para vigas reforzadas con barras de plástico cuya matriz contiene fibra de vidrio. La segunda serie se utilizó para comprobar la exactitud de la modificación propuesta en el modelo mínimo refuerzo.

Los resultados de las pruebas de la serie primera indicaron que la capacidad de flexión de las vigas reforzadas con barras de plástico con fibra de vidrio se podía predecir con precisión utilizando la teoría de diseño final. También mostraron que el modelo de ACI para el cálculo de la flexión de carga de servicio subestimaba la flexión real de estas vigas.

Los resultados de las pruebas de la segunda serie revelaron que existía una gran concordancia entre el comportamiento previsualizado y el de las muestras de ensayo, lo que sugirió la validez del modelo propuesto para el cálculo de la armadura mínima requerida para vigas reforzadas por barras de plástico con matriz de fibra de vidrio.

#### **2.5.7- COMPOSITES DE FIBRA DE VIDRIO DE BAJO COSTE CON UNA MAYOR RESISTENCIA A LOS ÁLGALIS ADAPTADO PARA EL REFUERZO DE HORMIGÓN <sup>[9]</sup>**

Este estudio continúa con los composites de polímeros reforzados con fibra de vidrio, los cuales fueron modificados mediante la introducción de iones con el fin de mejorar su durabilidad en el ambiente alcalino del hormigón. Los materiales compuestos de fibra de vidrio ofrecían un equilibrio óptimo de rendimiento y de coste

para el reemplazo de refuerzo de acero, los cuales son propensos a la corrosión en el hormigón. Como ya se ha comentado anteriormente, su rápido deterioro en el ambiente alcalino del hormigón es un gran inconveniente.

Investigaciones de laboratorio exhaustivas y procesos de pultrusión a escala industrial, se llevaron a cabo, lo que demostró con éxito que la introducción de intercambiadores de iones seleccionados en la matriz polimérica (o una capa de superficie de la matriz) no interfiere con el proceso de pultrusión, y los rendimientos presentaban ganancias significativas en la resistencia a los álcalis de composites de fibra de vidrio. Las características mecánicas de las barras de material compuesto con fibra de vidrio, que fueron modificadas (con recubrimiento intercambiador catiónico débil ácido) se investigaron mediante la realización de ensayos de compresión, flexión y cizalladura. Los resultados indicaron que la modificación de las barras de pultrusión no alteró su rendimiento mecánico.

## 3- DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1- MATERIALES Y COMPONENTES

Es importante que tanto en la fabricación del hormigón como en la ejecución de los ensayos se siguiera el mismo procedimiento y las mismas especificaciones que se utilizan actualmente en otras empresas que fabrican y comercializan su hormigón en el mercado nacional.

Puesto que la empresa FIBRATEC suministra fibras de vidrio para su aplicación en la construcción de soleras, o sea de elementos de construcción colocados en forma horizontal y sobre la cual se asentarán otros elementos constructivos verticales, las fibras utilizadas en la fabricación de las distintas probetas que se iban a ensayar, fueron las mismas que se utilizarían en la fabricación del producto final. Por lo que fue la propia empresa la encargada de suministrar dicho material.

Como se dijo en la Introducción, en este trabajo se busca comparar las variaciones que puedan presentarse en las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibra de vidrio AR, amasando con combinaciones entre tres (3) diferentes dosificaciones y tres (3) diferentes longitudes de fibras. Se añadieron fibras de vidrio en longitudes de 13, 25 y 30-36 mm. Cada longitud de fibra, se amasó con el hormigón con tres (3) dosificaciones diferentes: 2, 4 y 6 kg/m<sup>3</sup>, obteniéndose probetas cilíndricas y prismáticas normalizadas necesarias para realizar los ensayos de evaluación de las variaciones en las propiedades mecánicas mencionadas en el apartado de los objetivos específicos de este trabajo. Por lo que se ensayaron nueve tipos de probetas diferentes y se compararon con un hormigón exactamente igual pero sin fibras, al cual a partir de este momento se le llamó hormigón control, y era la referencia comparativa con los composites hormigón-fibra de vidrio en el análisis de los resultados.

De esta forma se obtuvieron las siguientes combinaciones de ensayos:



Dosificación (Kg/m <sup>3</sup> )	Longitudes (mm)
0	0
2	13, 25 y 30/36
4	13, 25 y 30/36
6	13, 25 y 30/36

para un número total de amasadas de diez (10). Primero se hizo una primera amasada sin ningún tipo de refuerzo y luego, en días diferentes otras nueve (9) que resultan de las combinaciones de las tres longitudes con las tres dosificaciones. Los productos de todos y cada uno de las amasadas se vertieron en moldes normalizados cilíndricos y prismáticos, dejándose curar en los mismos dos (2) días, al termino de los cuales se desmoldaron y se introdujeron en una cámara climática, manteniendo la temperatura fija a 19,5 °C y la humedad relativa constante con un valor de 95 %, por un periodo de veintiocho (28) días, para finalmente sacarlas y someterlas a diferentes ensayos evaluadores de las propiedades mecánicas mencionados antes en los Objetivos Específicos.

A continuación se expondrán los materiales que se han utilizado:

### 3.1.1- CEMENTO.

El cemento utilizado ha sido CEM III/A 42,5 SR. Tal y como describe la Norma UNE-EN 197-1:2000, se trata de un cemento:

- III/A → Cemento portland con escorias de horno alto con dosificación menor en escoria.
- 42.5 → Categoría resistente alta.
- SR → Resistente a los sulfatos.

Se trata de un cemento muy utilizable para cimentaciones de hormigón en masa, obras de hormigón en masa de grandes volúmenes y cimentaciones de hormigón armado, por lo que la elección del cemento es adecuada.

### 3.1.2- ÁRIDOS.

El tipo de árido utilizado han sido áridos calizos (ver Fig.2), a los cuales se les ha sometido a un análisis granulométrico según la Norma NLT-150, para determinar la distribución de tamaños existente en cada muestra. Para ello se utilizaron una serie de tamices ordenados de mayor a menor luz de malla. En la Fig.5 se presenta una fotografía de esta serie.



**Fig. 5:** A) Áridos calizos triturados utilizados en la realización de del hormigón reforzado con fibra de vidrio AR. B) Relación de tamices utilizados para analizar la granulometría de la grava y la arena según norma NLT-150

Se utilizó la norma EHE-08 para designar los áridos tal y como específica en su Artículo nº 28, concretamente en 28.2: Designación de los áridos. Esta Norma enuncia así mismo que la procedencia de los áridos debe estar de acuerdo con la norma UNE-EN 12620:

- GRAVA → AG- 6/20- T- C
- ARENA → AF- 0/4- T- C

Esta designación quiere decir que la grava está formada por árido grueso (AG), cuya granulometría oscila entre los tamices 20 y 6 mallas. La naturaleza de los áridos es caliza y su forma de presentación es triturados (de machaqueo).

Lo mismo ocurre con la arena que presenta semejante naturaleza y forma de presentación, pero cuya granulometría oscila entre los tamices de 4 y un fondo cerrado de la serie.

### **3.1.3- AGUA**

El agua utilizada será el que corresponde con el abastecimiento público que llega al laboratorio donde se realiza el amasado. Esa agua ya ha sido utilizada en numerosas amasadas anteriores correspondiente a otros hormigones y no ha dado ningún problema.

Se cumple así con lo establecido en el Artículo 27 de la Norma EHE-08 donde dice: “El agua utilizada, tanto para el amasado como para el curado del hormigón en obra, no debe contener ningún ingrediente dañino en cantidades tales que afecten a las propiedades del hormigón o a la protección de las armaduras frente a la corrosión. En general, podrán emplearse todas las aguas sancionadas como aceptables por la práctica.”

### **3.1.4- FIBRA DE VIDRIO AR.**

Como ya se ha mencionado anteriormente la fibra fue suministrada por la empresa FIBRATEC, por lo que se obtienen los datos técnicos acudiendo a ellos. Estos datos son los siguientes:

- Designación: FIBRATEC - Vidrio AR V 12 AM

• Datos técnicos:

**Tabla 1:** Datos técnicos de las Fibras de Vidrio tipo AR obtenidos de la página web de la empresa FIBRATEC

Resistencia a la tracción	1.620 MPa
Límite de carga de rotura	0,4N/TEX
Límite elástico	74.000MPa
Alargamiento de rotura AR	165 mm
Contenido de Zirconio	19,1%
Peso específico	2.70 g/cm <sup>3</sup>
Resistencia al álcali	Alta
Resistencia al ácido	Alta
Punto de fusión	> 1500 °C
Conductividad térmica	Baja
Conductividad eléctrica	Baja

• Composición química:

**Tabla 2:** Composición química de las Fibras de Vidrio tipo AR (Información obtenida de la página web de la empresa)

SiO <sub>2</sub>	>58,7
ZrO <sub>2</sub>	19,1
CaO	6,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.3
Na <sub>2</sub> O	13,7
K <sub>2</sub> O	1,67
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<0.5

### 3.2- DOSIFICACIÓN.

La dosificación inicial de partida para un volumen de 1 m<sup>3</sup> de hormigón H-25 para solera, hormigón control, fue la siguiente:

**Tabla 3:** Dosificación hormigón control correspondiente para 1m<sup>3</sup>

<b>Dosificación - Hormigón de control para fibras</b>		
CEM III/A 42,5 SR	250	Kg
Grava 6/20	824	Kg
Arena 0/4	1047	Kg
Agua (con corrección del aditivo hecha)	170	l
Aditivo polifuncional	7 ‰ cemento	Kg
Fibra	0	kg

Dosificación para una cantidad aproximada de 90 litros:

**Tabla 4:** Dosificación hormigón control correspondiente para 90 l

<b>Dosificación - Hormigón de control para fibras</b>		
CEM III/A 42,5 SR	22,5	Kg
Grava 6/20	74,16	Kg
Arena 0/4	94,23	Kg
Agua (con corrección del aditivo hecha)	15,19	l
Aditivo polifuncional	0,16	Kg
Fibra	0	kg

Los procesos de amasados del hormigón sin y con refuerzo, con las distintas combinaciones dosificación-longitud de fibra se llevaron a cabo en el “Laboratorio de Hormigón” adscrito al Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación,

ubicado en el edificio polivalente del Campus de Viesques-Gijón de la Universidad de Oviedo. En la Fig. 6 se presenta una foto del equipo de amasado utilizado.

El equipo de amasado es marca: Betonmass, modelo: ST 150 CD, con las siguientes características técnicas:

Capacidad: 150 litros

Potencia (KW): M: 5.5 < CV, SK: 3 < CY

Nº FABRICACIÓN: 12008

FECHA FABRICACIÓN: 2008

MASA: 500 Kg

EJE VERTICAL



**Fig. 6:** Equipo de amasado de hormigones marca: Bentomass, modelo ST 150 CD

El proceso de amasado del hormigón con fibras fabricado en el laboratorio de la Universidad fue el siguiente:

1. Vertido del árido grueso, con el skip (método para transportar el árido mediante ciclos de carga), más giro de 3 segundos.
2. Vaciado de la arena, con el skip, más giro de 3 segundos.
3. Vertido del cemento, directamente a la amasadora, más giro de 3 segundos.
4. Mezclado de las fibras de vidrio con el hormigón que se está amasando, añadiéndolo directamente a la amasadora en la dosis y con la longitud prefijada, mientras se hacen girar las palas. Se ha de desmenuzar la fibra con la mano enguantada para que no se aglomere.
5. Amasado durante 3 minutos mientras se vierte toda el agua a excepción de entre 300 ó 500 ml.
6. Reposo de 2 minutos.
7. Amasado durante 3 minutos y vertido del agua restante y del aditivo.
8. Vertido del hormigón, llenado de las probetas (ver Fig.7 y 8) normalizadas en tres tandas, punzonando cada una de las capas 25 veces en espiral con la barra manual y martillando con el mazo de goma o nylon tras el llenado de cada tanda y previamente al vertido de la siguiente, hasta que comience a salir lechada.
9. Finalmente se frataso la superficie con la llana.



**Fig. 7:** Llenado de las probetas normalizados sobre mesa de vibrado



**Fig. 8:** Probetas normalizadas cilíndricas y prismáticas para el vertido del hormigón reforzado con fibra de vidrio AR

### **3.3- TRATAMIENTO PROBETAS**

Una vez vertido el hormigón en los moldes, punzonando cada tongada y fratasando la superficie con una llana, se dejaron dos días para el curado del hormigón.

Una vez finalizado este intervalo de tiempo, se desmoldan, y se introducen en una cámara climática (ver Fig. 9), la cual consiste en un cuarto cerrado en la que se las mantiene a una temperatura de 19.5 °C y a una humedad de 95%, ambas de manera constante, durante 28 días.





**Fig. 9:** A) Cámara climática para el curado de las probetas de hormigón. B) dispositivo de control de la cámara el cual indica la temperatura y la humedad relativa a la cual se encuentra ésta

El periodo es de 28 días ya que así lo marca la normativa para ensayos normalizados. En la Fig. 10 se observa el valor de la resistencia a compresión de un hormigón tomando como unidad la resistencia a los 28 días, lo cual permite hacerse una idea de cómo evoluciona la respuesta del hormigón al someterle a esfuerzos de compresión.

Evolución de la Resistencia a compresión de un Hormigón Portland normal					
Edad del hormigón en días	3	7	28	90	360
Resistencia a compresión	0,40	0,65	1,00	1,20	1,35

**Fig. 10:** Evolución de la resistencia a compresión de un hormigón portland normal a lo largo del tiempo

Al término de este tiempo es cuando se realizaron los ensayos.

### 3.3.1- REFRENTADO DE LAS PROBETAS CILÍNDRICAS

Las probetas cilíndricas antes de ser sometidas al ensayo de compresión deben refrentarse.

Este tratamiento <sup>[10]</sup> consiste en la aplicación de un mortero de azufre en la cara no lisa (no irregular) de la probeta con el objetivo de corregir los defectos de planeidad y

paralelismo entre las caras con el fin de obtener la mejor coincidencia posible con las piezas de apoyo y carga de la prensa de ensayo y una distribución uniforme de tensiones durante la realización del ensayo. Para ello es necesario un dispositivo de refrentado, constituido con material inerte al mortero y mecánicamente resistente. Consta de un plato de refrentado, que debe tener un diámetro superior en 25 mm al diámetro de la probeta, de superficie plana con una desviación máxima de 0,05 mm en 150 mm y dureza superior a 60 HRC, y un mecanismo de alineación que asegure la ortogonalidad entre la superficie refrentada y el eje de la probeta dentro de un margen de 0,5°.

En primer lugar se procede a pesar los distintos componentes secos que componen el mortero y se colocan en un recipiente de calentamiento a una temperatura que no supere los 150°C. Se deshacen mientras se homogeniza la masa con ayuda de una varilla metálica. Se considera que el mortero está preparado cuando el azufre esté totalmente fundido. En este instante la temperatura de conservación habrá que situarla entre los 120 y 130 °C.

Posteriormente se coge el dispositivo de refrentado, perfectamente limpio y preferiblemente un poco caliente para evitar un resfriamiento rápido del mortero y se aplica, al plato, una ligera capa de aceite o sacándolo del molde.

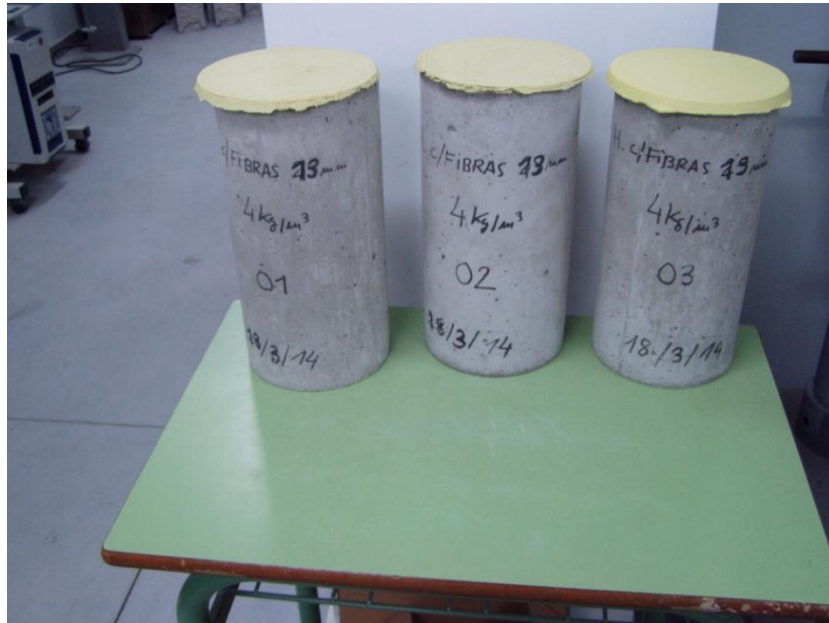
Se pone una cantidad suficiente de mortero de forma que el plato quede totalmente lleno. Inmediatamente después se coloca la probeta sobre éste presionándola en sentido descendiente y contra el soporte perpendicular del dispositivo, tal y como se muestra en la Fig. 11.



**Fig. 11:** Realización de refrentado sobre probeta de hormigón

De esta manera se consigue que la cara refrentada sea perpendicular al eje de la probeta.

El refrentado sólo se realiza en una cara, la cara que ha sido fratasada con la llana ya que ésta es la que no tiene la planeidad requerida (Ver Fig. 12).



**Fig. 12:** Probetas refrentadas para el ensayo de compresión

### 3.3.2- REALIZACIÓN DE ENTALLA EN LAS PROBETAS PRISMÁTICAS

Las probetas prismáticas que van a ser sometidas al ensayo de fractura, deben presentar una entalla lateral, la cual se situará durante el ensayo en la zona sometida a tracción

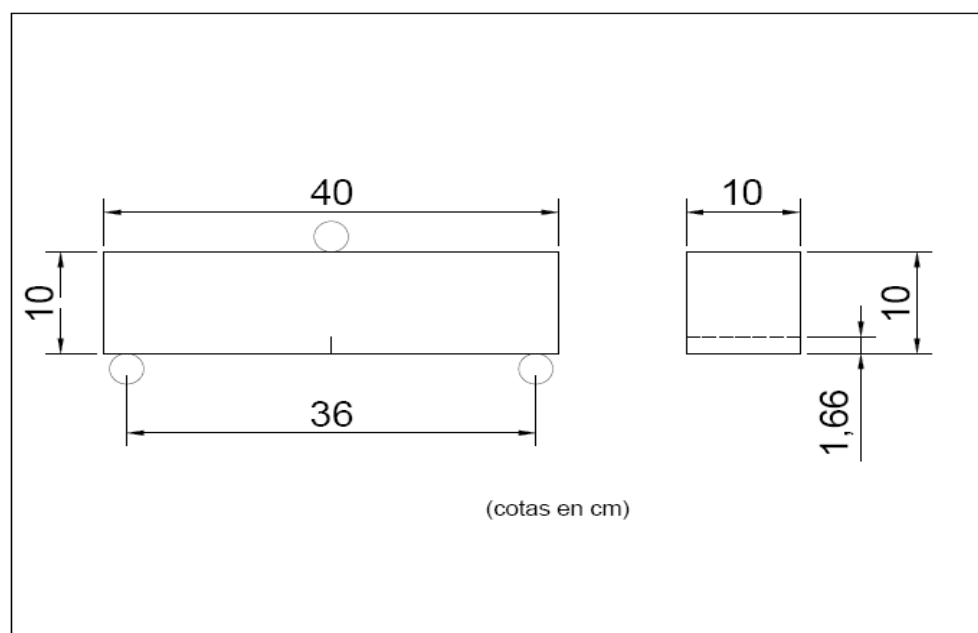
Dicha entalla se realizó de manera mecánica con una máquina cortadora con sierra de disco de diamante. Se realizó en el Laboratorio de Resistencia de Materiales ubicado en el Campus de Viesques-Gijón, pertenecientes a la Universidad de Oviedo.

La maquinaria utilizada fue una sierra eléctrica de mesa marca Alba modelo TRV4 (ver Fig. 13), equipo de trabajo utilizado para el corte de piezas cerámicas compuesto por una mesa fija y un disco de sierra de diamante accionado por un motor dotado de un movimiento longitudinal.



**Fig. 13:** Máquina cortadora ALBA TRV4 con sierra de disco de diamante para realización de entallas en probetas de hormigón

Las dimensiones tanto de la probeta como de la entalla se representan en la Fig. 14. En ella puede observarse que las probetas son prismáticas de 10x10x40 cm y que la entalla se sitúa en el centro de una de las caras de mayor área. Los círculos de la figura representan las zonas de apoyo y de aplicación de la carga durante el ensayo, así como la orientación de la entalla con respecto a la sollicitación de esfuerzos. En la vista transversal se ve la geometría de la entalla. Esta abarca en su totalidad el lado menor de la probeta, teniendo una profundidad de 1.66 cm.



**Fig. 14:** Dimensiones de la probeta y de la entalla en probeta prismática. Se muestra la distancia de los apoyos en el ensayo de fractura así como la orientación de la entalla

En la Fig. 15 pueden verse una serie de probetas previas a la realización del ensayo de flexión en tres puntos, a las cuales se las ha realizado la entalla mediante la sierra eléctrica de mesa.

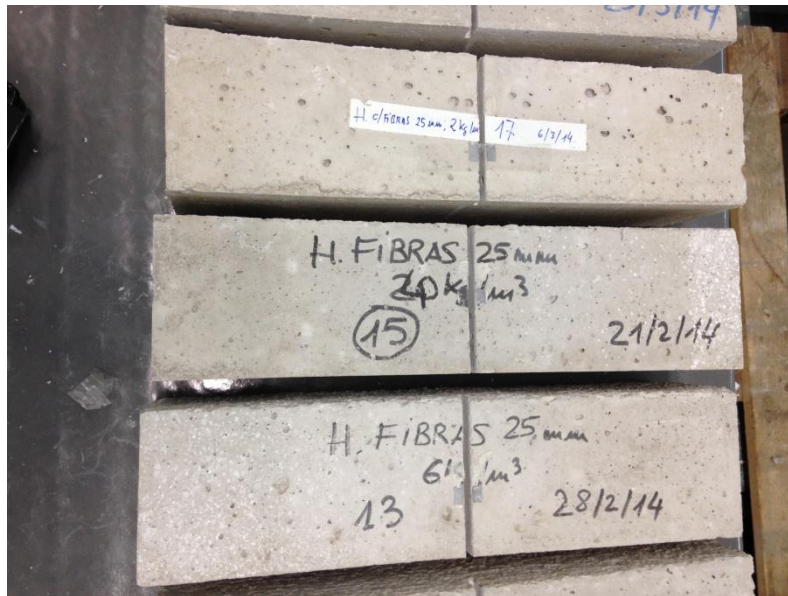


Fig. 15: Probetas entalladas previas a la realización del ensayo

Para la realización de este mismo ensayo, se decidió colocar un extensómetro para estudiar la progresión de abertura de la entalla, desde el momento inicial, sin esfuerzos, hasta el momento último de carga, en el cual la probeta rompe.

Una galga extensométrica o extensómetro (ver Fig. 16) es un sensor, para medir la deformación, presión, carga, torsión, posición, entre otras cosas, que está basado en el efecto piezorresistivo, el cual es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se les someten a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos. La galga extensométrica hace una lectura directa de deformaciones longitudinales en cierto punto del material que se está analizando.

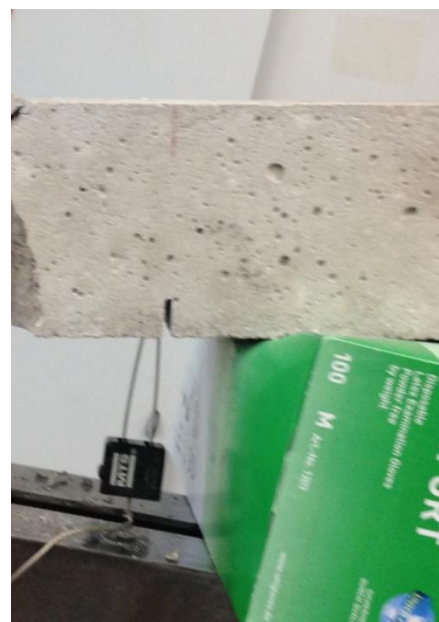
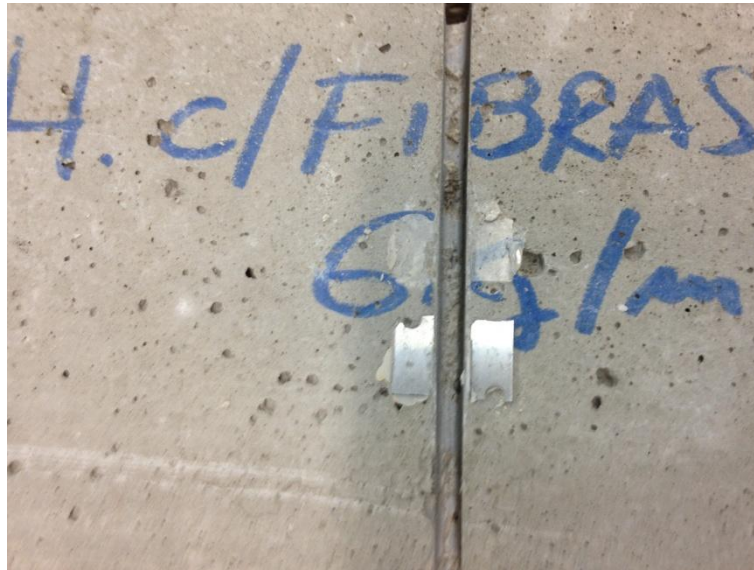


Fig. 16: Extensómetro colocado en entalla de probeta

Por este motivo se debió colocar dos piezas metálicas fijadas con un adhesivo especial. La distancia inicial vino definida por la norma. En la Fig.17 se aprecian las piezas metálicas, situadas debajo de la escritura que define la probeta.



**Fig. 17:** Piezas metálicas para colocación del extensómetro, dispuestas en probeta de hormigón

### **3.4- ENSAYOS**

Los ensayos se realizaron en la Universidad de Oviedo, Campus de Gijón, en los laboratorios de: Resistencia de Materiales y de Tecnología del Hormigón, adscritos ambos al Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación y el Laboratorio

Con el fin de cuantificar el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de vidrio, se procede a la elaboración de una serie de ensayos de caracterización estática. Se proponen los siguientes ensayos:

### 3.4.1- ENSAYO DE COMPRESIÓN

Cuantifica la influencia de la presencia de las fibras sobre la resistencia a compresión. Se empleará probeta cilíndrica de diámetro 15 cm y longitud de 30 cm, debidamente refrentada.

El ensayo se realiza según la norma UNE-EN- 12390-4. Para poder llevarse a cabo hay que disponer de una máquina dotada de regulación de cargas que permita aumentarlas de forma continua y sin saltos bruscos. Además la máquina dispondrá de dos platos de acero, planos y rectificadas, que contendrán marcas, guía acanalada, de forma que permitan el correcto centrado de la probeta.

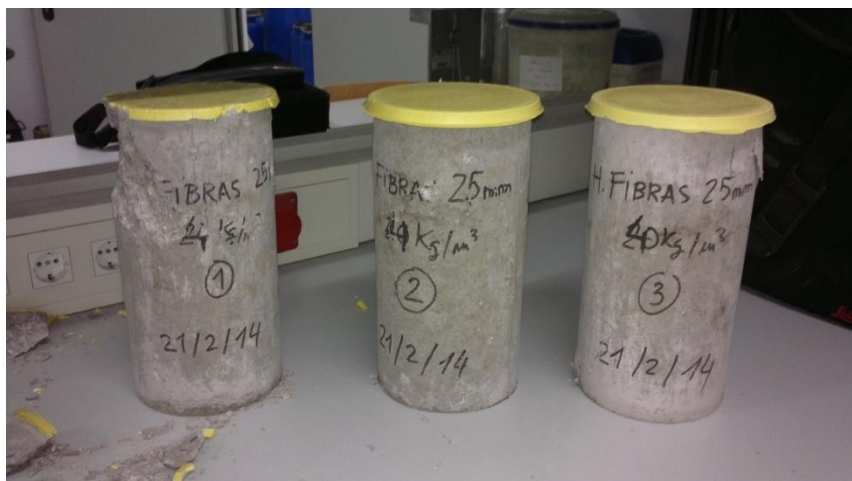
Se ensayaran probetas debidamente refrentadas. Las probetas que hayan estado curadas en cámara húmeda tienen que perder humedad antes de su rotura. El tiempo máximo transcurrido de su extracción de la cámara de conservación, no será superior a 3 horas.

La probeta se coloca de forma muy cuidadosa en el plato inferior centrándola con ayuda de las marcas de referencia, tal y como se representa en la Fig. 18. Acto seguido se aproximan los platos de la prensa de forma que el superior se coloque perfectamente en la cara superior de la probeta, sin atribuirle carga a ésta. A continuación se aplicará la carga de forma continua y sin choques bruscos, de manera que el aumento de tensión medio sobre la probeta sea de  $5 \pm 2 \text{ kgf/cm}^2/\text{s}$ . En estas condiciones se sigue aplicando carga hasta que la probeta deforme rápidamente. Se anotará la carga máxima obtenida en el momento de rotura (ver Fig.19).



**Fig. 18:** Probetas cilíndricas normalizadas y refrentada colocada previa realización del ensayo a compresión

El resultado se calcula dividiendo la carga de rotura en Newtons, por la superficie de la base de la probeta en  $\text{mm}^2$ . El valor de resistencia a compresión se expresa en MPa ( $\text{N}/\text{mm}^2$ ).



**Fig. 19:** Probetas cilíndricas en momento posterior del ensayo de compresión



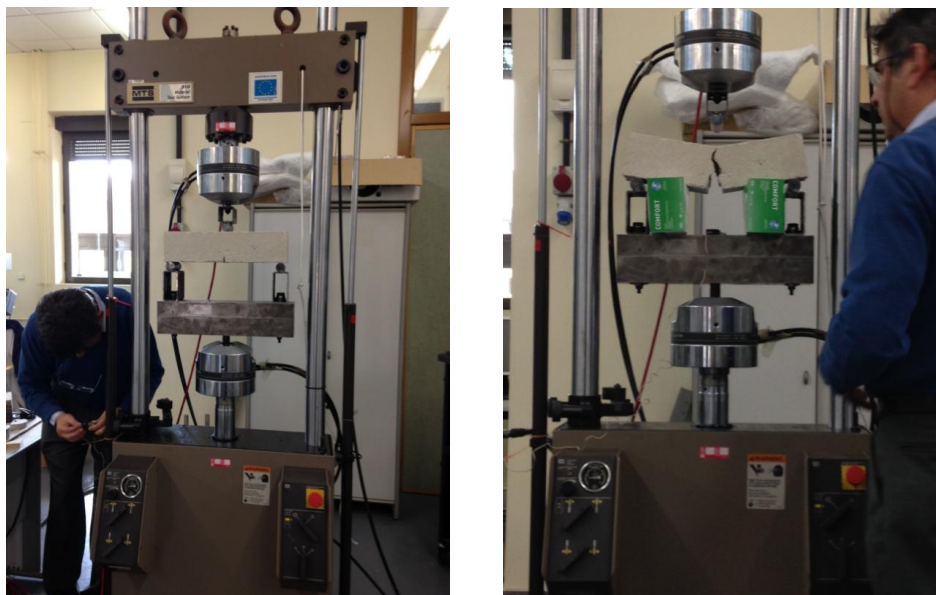
### 3.4.2- ENSAYO DE FLEXIÓN EN TRES PUNTOS

Este ensayo se realiza para cuantificar la influencia de la presencia de fibras sobre la resistencia a fractura.

Consiste en un ensayo de flexión en tres puntos con probeta entallada. Se empleará probeta prismática de 100x100x400mm a la que se mecanizará una entalla lateral, la cual al realizar el ensayo en la zona sometida a esfuerzo de tracción.

Este ensayo se llevará a cabo según norma UNE-EN 12390-5. Primero se limpian todas las superficies de los soportes del dispositivo de ensayo, y se eliminan de las caras de la probeta que van a estar en contacto con los rodillos todo el polvo u otros materiales extraños. A continuación se coloca la probeta en el dispositivo de ensayo, correctamente centrada con su eje longitudinal en ángulo recto con los ejes longitudinales de los rodillos superiores e inferiores, como se representa en la Fig.20 y se coloca el extensómetro.

La carga no se comienza a aplicar hasta que los rodillos de carga y los de apoyo descansen firmemente sobre la probeta. Tras aplicarle una carga inicial muy baja, se le aplica la carga de forma continua y sin brusquedades con el incremento constante seleccionado hasta que la probeta no soporte una carga mayor (ver Fig.18).



**Fig. 20:** A) Probeta colocada en máquina de ensayo de flexión en tres puntos previa colocación de extensómetro. B) Probeta durante ensayo de flexión en momento posterior a su carga de rotura

Se calculará también la flecha, el límite de proporcionalidad y la resistencia residual según norma UNE-EN- 14659-A1. El límite de proporcionalidad es la tensión que actúa en el fondo de la entalla y la resistencia residual es la tensión ficticia que actúa en el fondo de la entalla en un momento determinado del ensayo, respectivamente.

### 3.4.3- ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA

Este ensayo tiene por objetivo cuantificar la profundidad de penetración de agua producida tras aplicarle agua a una presión de 5 bares durante  $72 \pm 2$  horas. Se ensayan tres probetas cilíndricas normalizadas que contengan la misma dosificación.

El ensayo se realiza conforme a la norma UNE-EN- 12390-8. Inmediatamente después de desmoldar la probeta, se desbasta la superficie de la cara de la probeta que va a estar expuesta a la presión del agua, con un cepillo de púas metálicas y se cura la probeta en agua de acuerdo con los procedimientos indicados en la Norma EN 12390-2. Se deben ensayar las probetas cuando al menos tengan una edad de 28 días. No se aplica el agua a presión a la cara fratasada de la probeta. La probeta se coloca en el equipo de ensayo y se aplica al agua una presión de  $(500 \pm 50)$  kPa durante  $(72 \pm 2)$  h (ver Fig.21). Durante el ensayo, se observa periódicamente el estado de las superficies de la probeta de ensayo no expuestas al agua a presión para identificar la posible presencia de agua. Si se observaran filtraciones, se reconsiderará la validez del resultado y se registra el hecho en el informe.



**Fig. 21:** Probetas cilíndricas durante ensayo de penetración de agua

Después de aplicar la presión durante el tiempo especificado, se retiran las probetas del equipo de ensayo. Se limpia la cara a la que se aplicó la presión de agua para retirar el exceso de agua. Se rompe la probeta en dos mitades, perpendicularmente a la cara en la que se aplica la presión de agua (ver Fig.22). Cuando se rompa la probeta, y durante el examen la cara de la probeta expuesta a la presión del agua se situará en el fondo.



**Fig. 22:** Rotura de probeta posterior al ensayo de penetración de agua

Tan pronto como la cara partida se ha secado de forma tal que se puede ver claramente la extensión del frente de penetración de agua, se marca en la probeta dicho frente de penetración. Se mide la profundidad máxima de penetración bajo la superficie de ensayo y se redondea al mm más próximo.

Tras anotar la penetración máxima, se procede a la determinación de la penetración media. Dicha penetración se calcula con la siguiente fórmula.

$$P_m = \frac{A_{pf}}{d}$$

Donde:  $P_m$  es la penetración media  
 $A_{pf}$  es el área del frente de penetración en  $\text{mm}^2$   
 $d$  es el diámetro o arista nominal de la probeta

Será pues necesario determinar el área del frente de penetración, para ello, se pesa una hoja de papel en la balanza (ver Fig.23) y se anota el resultado ( $M_p$ ).

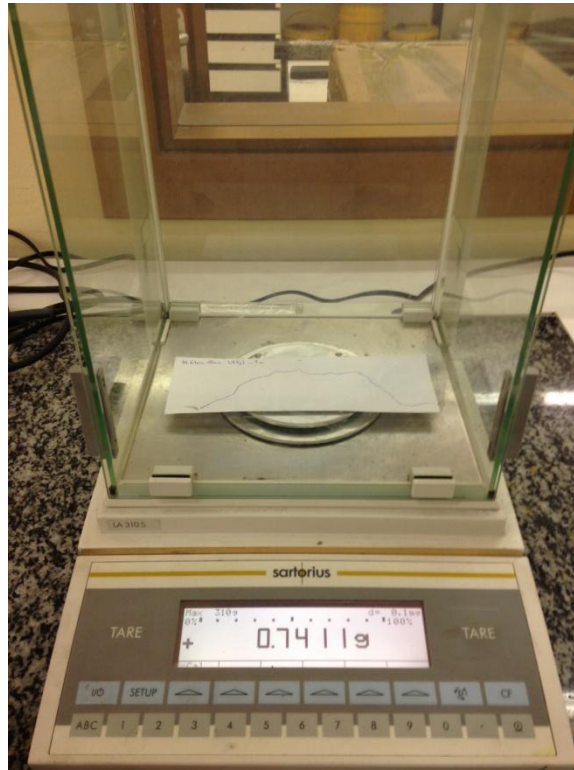


Fig. 23: Determinación del peso de la masa de papel inicial

Se apoya la hoja de papel sobre la cara partida de la probeta y se marca el frente de penetración, tal y como se muestra en la Fig.24. Se recorta el perímetro exterior siguiendo el dibujo marcado, para obtener una reproducción del frente de penetración. Se pesa esta reproducción en la balanza y se anota el resultado (Mpf).



Fig. 24: Reproducción en papel del frente de penetración

El área del frente de penetración viene definida por la siguiente expresión:

$$A_{pf} = \frac{A_p \times M_{pf}}{M_p}$$

Donde:

$A_p$  es el área del papel empleado en el método recomendado para la determinación del área encerrada por el frente de penetración, en  $\text{mm}^2$ .

$M_p$  es la masa del papel empleado en el método recomendado, en g.

$M_{pf}$  es la masa del papel cortado empleado en el método recomendado que representa la forma del frente de penetración, en g.

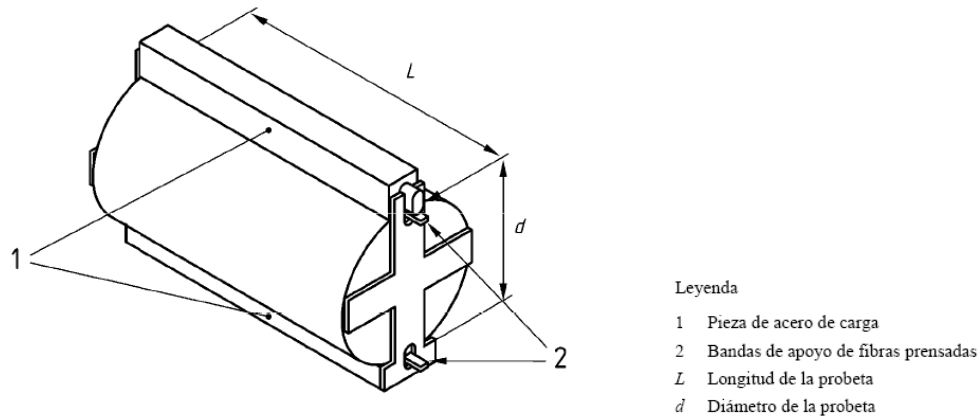
Una vez calculadas todas las áreas del frente de penetración, se calculan las penetraciones medias.

#### 3.4.4- ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

También llamado ensayo Brasileño, cuantifica la influencia de la presencia de las fibras sobre el “comportamiento a tracción”. Se ensayarán tres probetas cilíndricas de diámetro 15 cm y longitud 30cm.

El ensayo que se realiza según norma UNE-EN- 12390-6, tiene como objetivo determinar la resistencia a tracción indirecta de probetas cilíndricas sometidas a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud, en consecuencia, el resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta se rompa a tracción.

Se elimina el posible exceso de humedad de la superficie y se coloca la probeta en el dispositivo de ensayo con la generatriz trazada sobre una banda de fibras prensadas de 10 mm de ancho, 4 mm de espesor y una longitud superior a la de la probeta, como se representa en la Fig. 25.



**Fig. 25:** Dispositivo de ensayo según norma

Después se sitúa, sobre la generatriz superior opuesta otra banda idéntica a la descrita y sobre ésta una barra de sección rectangular mínima de 50 mm de anchura y de espesor igual o superior a la mitad de la diferencia entre la longitud de la probeta y la mayor dimensión del plato de la prensa.

Se sitúa el dispositivo centrado en los platos de prensa (ver Fig.26), se aproximan los platos para poder fijar la posición del conjunto, sin aplicación de carga.



**Fig. 26:** A) Máquina de ensayo brasileño del Laboratorio de Hormigón. B) Probeta introducida en máquina previa a la realización del ensayo de tracción indirecta

A continuación, con un incremento de presión constante de entre 4 y 6 Mpa/s, se procede a la rotura de la probeta, anotándose la carga total obtenida (ver Fig.27). La expresión de resultados se realizará tal y como indica la norma, la cual indica que la resistencia a tracción indirecta viene dada por la fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d}$$

Donde:

$f_{ct}$  es la resistencia a tracción indirecta, en megapascales (Mpa) o en newtons por milímetro cuadrado ( $N/mm^2$ ).

F es la carga máxima, en newtons (N)

L es la longitud de la línea de contacto de la probeta, en milímetros (mm).

d es la dimensión de la sección transversal, en milímetros (mm).



**Fig. 27:** Probeta rota mediante tracción indirecta

#### **3.4.5- ENSAYO DE ULTRASONIDOS**

Este ensayo tiene por objeto el cuantificar el tiempo de recorrido de una onda ultrasónica dentro del hormigón, entre un transductor emisor y un transductor receptor, acoplados al hormigón que se ensaya.

Este método, no destructivo, es económico y sencillo. Permite detectar discontinuidades internas, tanto en la calidad de los materiales como en el caso de grietas, fisuras y coqueras.

Este ensayo está regulado por la norma UNE 83308-72. El procedimiento consiste en colocar el transductor emisor en una zona de la probeta y el transductor receptor a una distancia de, al menos, 10 cm (ver Fig.28). El Equipo funciona de la siguiente manera, las ondas ultrasónicas son generadas por un cristal o un cerámico piezoeléctrico, el transductor emisor y que tiene la propiedad de transformar la energía eléctrica en energía mecánica y viceversa. Al ser excitado eléctricamente el transductor vibra a altas frecuencias generando ultrasonido. Las vibraciones generadas son recibidas por el material que se va a inspeccionar, y durante el trayecto la intensidad de la energía sónica se atenúa exponencialmente con la distancia del recorrido. Al alcanzar la frontera del material, el haz sónico es reflejado, y se recibe el eco por el transductor receptor. Su señal es filtrada e incrementada para ser enviada a un osciloscopio de rayos catódicos.



**Fig. 28:** Realización de ensayo de ultrasonidos

#### **3.4.6- ENSAYO DE CONSISTENCIA**

El ensayo de consistencia mediante cono de Abrams consiste en medir la disminución de altura que experimenta un tronco de cono de hormigón fresco, de medidas y elaboración estandarizada, cuando éste se deja libre. A mayor disminución de altura, menor consistencia del hormigón.



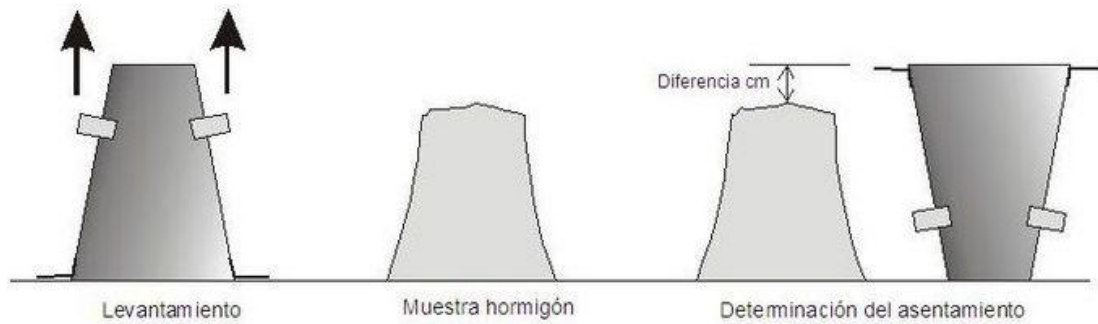
Este ensayo se realiza de acuerdo con la norma UNE 83.313. El ensayo se lleva a cabo en un molde en forma de tronco de cono, fabricado con chapa de acero galvanizado de base mayor 200 mm, base menor 100 mm y altura 300 mm, humedecido y colocado sobre una chapa metálica plana, rígida y no absorbente, como puede apreciarse en la Fig. 29.



**Fig. 29:** Cono de Abrams y placa rígida

Se sujeta fuertemente el molde sobre la chapa con los pies y se procede a llenarlo con tres capas, de forma que cada una de ellas sea un tercio del volumen del molde.

Con ayuda de una barra metálica de punta semiesférica de 16 mm de diámetro, se procede al compactado de cada una de las capas aplicando 25 pinchazos distribuidos uniformemente en superficie de la capa de modo que penetren hasta la capa inferior. Una vez compactada la última capa, se retira el hormigón sobrante y se enrasa con la línea de la base superior. Acto seguido, con cuidado, se levanta el molde en dirección vertical lo más rápido posible. Finalmente, se coloca el molde al lado de la muestra de hormigón y se procede a medir la diferencia entre la altura de la pieza y el punto más alto del hormigón (ver Fig.30).



**Fig. 30:** Procedimiento para el cálculo del asentamiento del hormigón y determinación de su consistencia

Esa diferencia será la que determine el tipo de consistencia que posee el hormigón en estado fresco. A continuación, en la Tabla 5, se muestra la interpretación de resultados, el asentamiento será la diferencia en cm. de la que anteriormente se ha hablado, y la columna de la izquierda muestra el tipo de consistencia que corresponde con ese asentamiento.

**Tabla 5:** Interpretación del asentamiento del hormigón en estado fresco para cono de Abrams

TIPO DE CONSISTENCIA	ASENTAMIENTO EN cm.
Seca (S)	0-2
Plástica (P)	3-5
Blanda (B)	6-9
Fluida (F)	10-15
Líquida (L)	16-20

### 3.4.7- ENSAYO DE AIRE OCLUIDO

El ensayo de aire ocluido consiste, esencialmente, en determinar la deformación elástica que experimenta el hormigón fresco bajo una presión dada y en condiciones definidas, y comparar esta deformación con la de un volumen conocido de aire sometido a la misma presión.

El ensayo viene regulado por la norma UNE 83.315. Para su realización se utiliza un aparato que consta de una cuba con tapa hermética (ver Fig.31), más unos accesorios

que permiten aplicar una presión conocida y observar su efecto en el volumen de muestra introducida.



**Fig. 31:** Aparato para realización de ensayo de aire ocluido sobre hormigón en estado fresco

## 4- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizados todos los ensayos se anotaron y se procedió a la realización de valores promedios con los resultados. Estos valores se establecen ya que se sometieron a ensayo diez tipos de probetas diferentes, nueve tipos que corresponden con el hormigón reforzado y la décima al hormigón referencia, el de control sin refuerzo. De estos diez tipos de hormigón, se ensayan tres probetas, con idéntica amasada, por lo que se establece un valor único como referencia e igual a la media de los tres. Posteriormente se grafican, se analizan y se discute separadamente cada propiedad mecánica como se muestra a continuación.

### 4.1- ENSAYO DE COMPRESIÓN

En primer lugar, en la Fig. 32, se presentan los resultados de los ensayos de evaluación de la resistencia a la compresión:

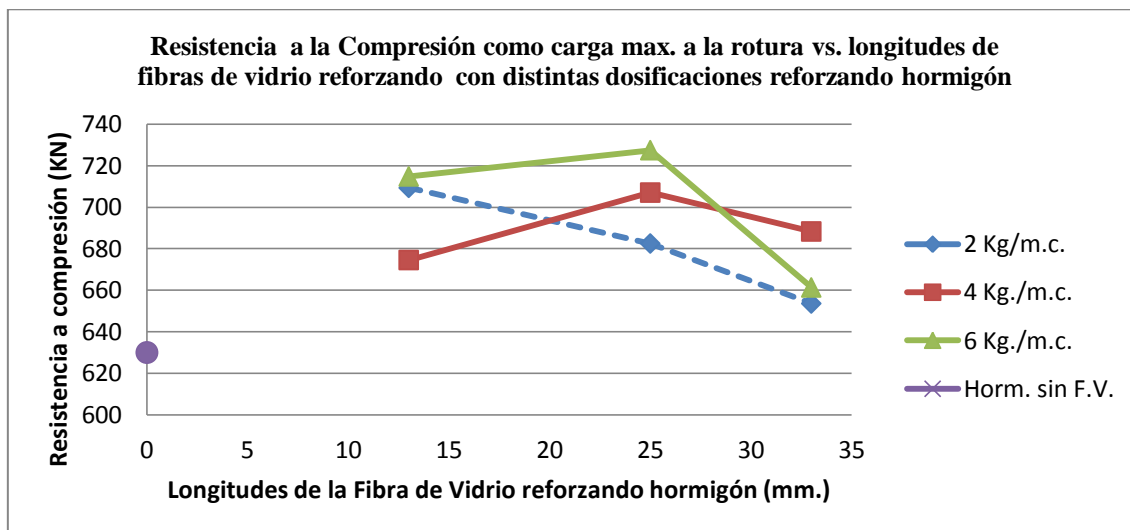


Fig. 32: Gráfico con los resultados del composite al someterlo al ensayo de compresión

Para esta propiedad mecánica se observa claramente la influencia de añadir fibra de vidrio como reforzante del hormigón en la realización de la amasada, ya que el valor de la Resistencia a la Compresión del hormigón de control (sin refuerzo) está por debajo de los valores de carga obtenidos en las distintas dosificaciones y longitudes de las fibras de los composite de hormigón reforzado con fibra de vidrio fabricados.

En la gráfica se observa que la dosificación de la fibra de vidrio en el hormigón influye en el incremento de la resistencia a la compresión, ya que para las longitudes

cortas de 13 mm. e intermedias de 25 mm. los mayores valores se obtuvieron con la mayor dosificación, la de 6 Kg/m<sup>3</sup>. Con las fibras más largas de 30 a 36 mm., se observa un descenso en los valores de carga a compresión en las tres dosificaciones, por lo que pareciera que aún cuando estas fibras más largas sí favorecen la resistencia a compresión, se comportan menos resistentes que las fibras de longitudes intermedias y más cortas.

#### 4.2- ENSAYO DE FLEXIÓN EN 3 PUNTOS

Con respecto a la Resistencia a la Flexión los valores del hormigón control y los del composite, no se observa una clara diferenciación en los valores de resistencia a la flexión obtenidos, ni con las distintas longitudes (ver Fig. 33) ni con las dosificaciones agregadas (ver Fig. 34).

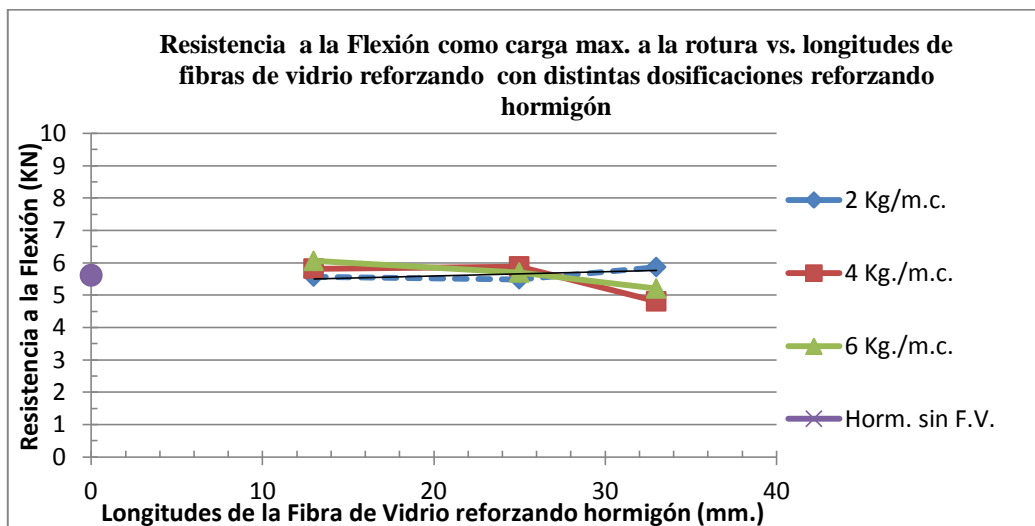
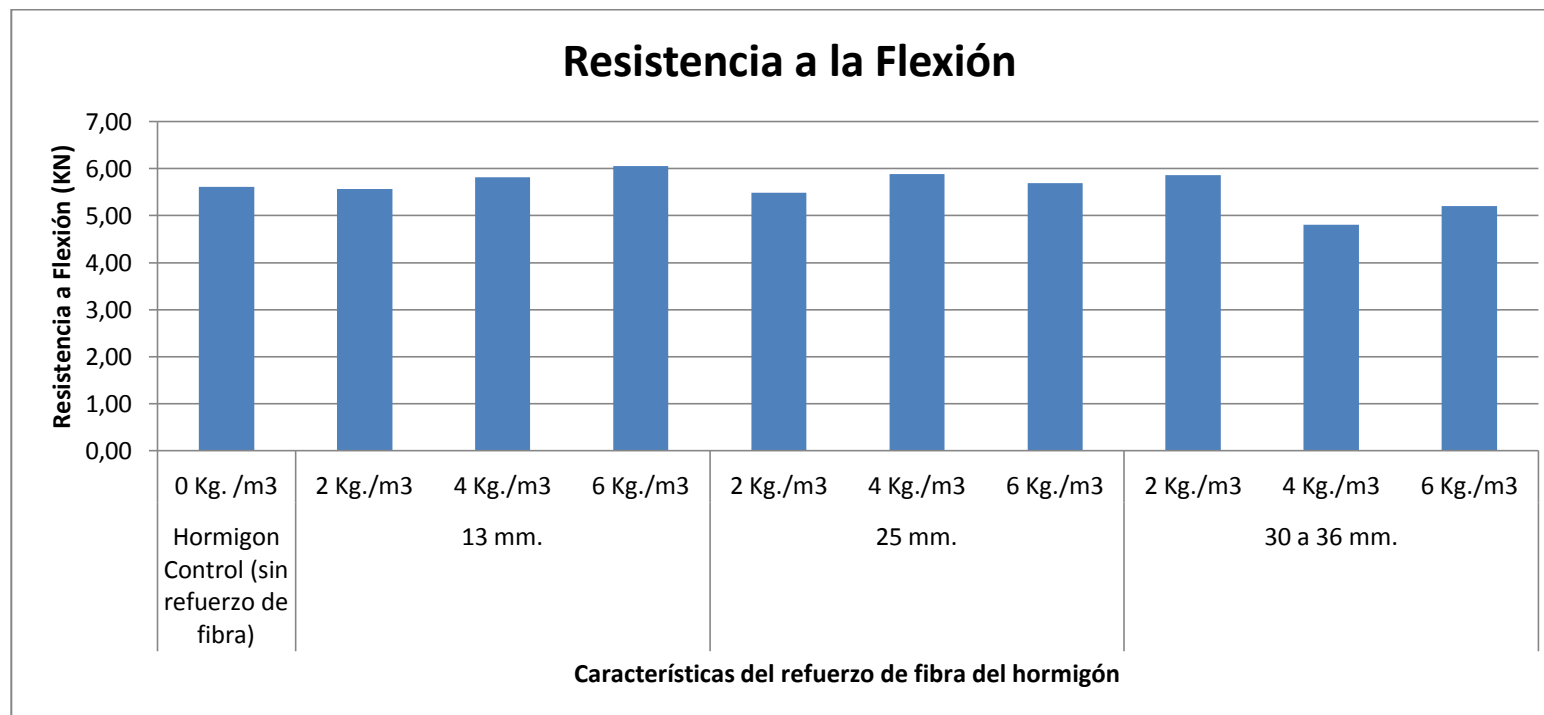


Fig. 33: Gráfico lineal con los resultados del composite al someterlo al ensayo de flexión



**Fig. 34:** Diagrama de barras con los resultados del composite al someterlo al ensayo de flexión

Cabe comentar que los valores que tienen dosificación de 4 y 6 Kg/m<sup>3</sup>, sí que se encuentran por encima del valor del hormigón control para las longitudes cortas e intermedias, por lo que en esas longitudes y masas por m<sup>3</sup> se mejora un poco esa propiedad. En cambio los valores de las fibras más largas de longitud de 30-36mm presentaron valores inferiores a los del hormigón de control en las dosificaciones de 4 y 6 Kg/m<sup>3</sup> aunque el valor correspondiente a la dosificación de 2 Kg/m<sup>3</sup> aumentó y dio más alto que el hormigón de control.

Con estos resultados en general se puede decir que la Resistencia a la Flexión del hormigón estudiado varia poco cuando se añade como agente reforzante fibra de vidrio AR en distintas cantidades y con distintas longitudes, aunque es de observar que cuanto mayor es la longitud del refuerzo, los mejores resultados se obtienen para la menor dosificación. Al aumentar la longitud de las fibras, resulta más óptimo emplear menor dosificación.

### 4.3- ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA

Al representar la distancia de recorrido del agua en la probeta normalizada fracturada por la mitad longitudinal, su penetración máxima, definido por la distancia entre el borde inferior y el punto más alto del área formada por el mojado del agua en la probeta, representado en el eje de las ordenadas de la gráfica de la Fig. 35.

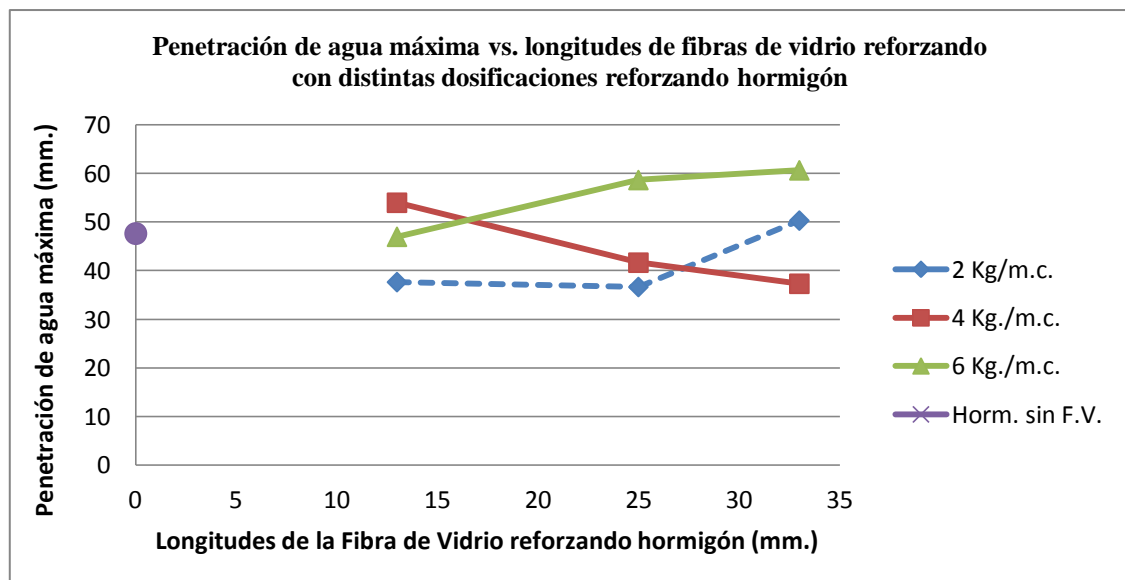


Fig. 35: Gráfico lineal con los resultados del composite al someterlo al ensayo de penetración de agua

En la gráfica no se observan una relación entre las curvas porque, mientras que para la dosificación de 6 Kg/m<sup>3</sup> aumenta progresivamente en función de que se incremente la longitud de las fibras, para la dosificación de 4 Kg/m<sup>3</sup> se produce un comportamiento contrario. La penetración de agua máxima descende a medida que aumenta la longitud de las fibras reforzantes.

Se observa que tres valores que se sitúan por encima de la penetración máxima del hormigón de control, para fibras cortas, de 13mm. , con dosificación de 4 Kg/m<sup>3</sup>. Así como también para las longitudes de fibras intermedias y largas correspondientes a las masas por m<sup>3</sup> de 6.

En la penetración media (ver Fig. 36) puede observarse que para las dosificaciones de 2 y 6 Kg/m<sup>3</sup> aumenta cuando aumenta la longitud de la fibra. Sin embargo para la curva perteneciente a 4 Kg/m<sup>3</sup> disminuye.

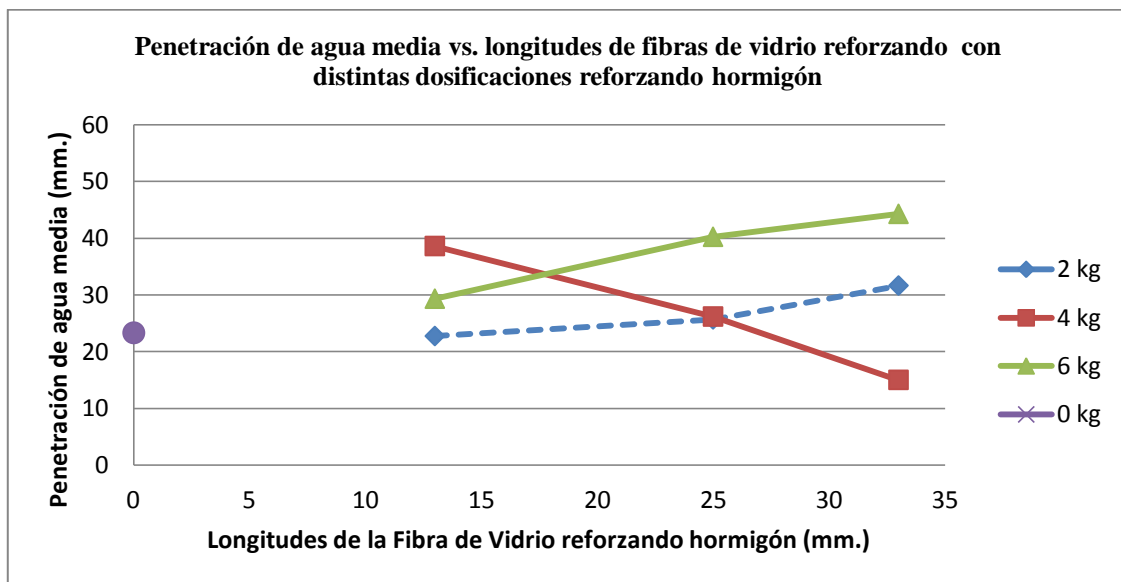


Fig. 36: Gráfico lineal con los resultados del composite al someterlo al ensayo de penetración de agua

Puede apreciarse también en la figura, que existen dos valores situados por debajo del hormigón sin refuerzo de fibras, el de control. Estos resultados corresponden a la dosificación menor con fibras cortas y a las fibras largas con dosificación media.

#### 4.4- ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

Los resultados que se obtuvieron en el ensayo de tracción indirecta, se reflejan en la Fig. 37. En la gráfica puede observarse que todos los valores se encuentran por encima del hormigón de control, por lo que puede afirmarse que el emplear como reforzante fibra de vidrio AR, mejora la reacción del hormigón antes esfuerzos de tracción indirecta.



Es necesario comentar que los valores más altos se obtuvieron para las fibras cortas en las tres dosificaciones. La cantidad de refuerzo no parece de extrema relevancia, ya que los tres valores son muy próximos y el valor máximo es el que tiene la menor dosificación, 2 Kg/m<sup>3</sup>, seguido de la mayor masa por unidad de volumen, 6 kg/m<sup>3</sup> y el valor menor corresponde a 4 Kg/m<sup>3</sup>. Cuando el refuerzo empleado son fibras de 25 mm., la resistencia a tracción indirecta desciende notablemente y tampoco es relevante la dosificación. Sin embargo, cuando el hormigón se refuerza con fibras largas, 30-36 mm., los valores no son tan próximos como en las otras longitudes.

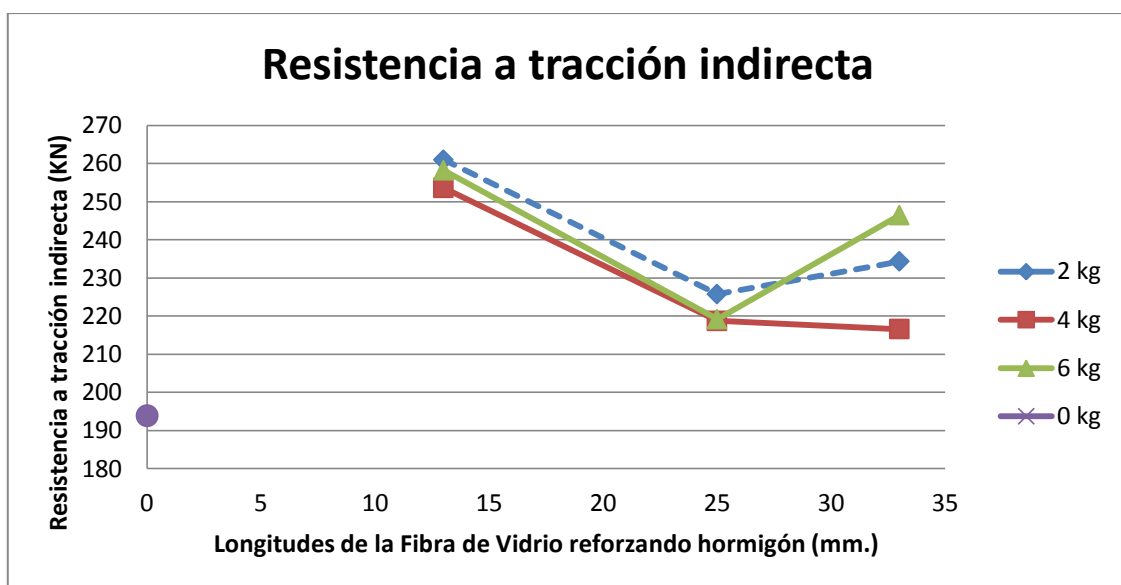
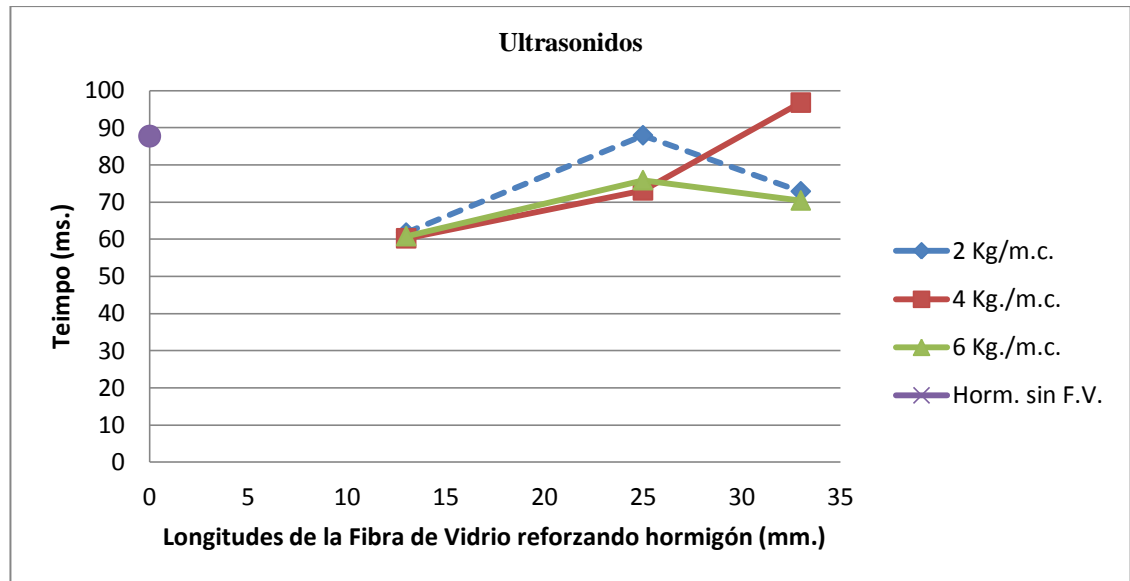


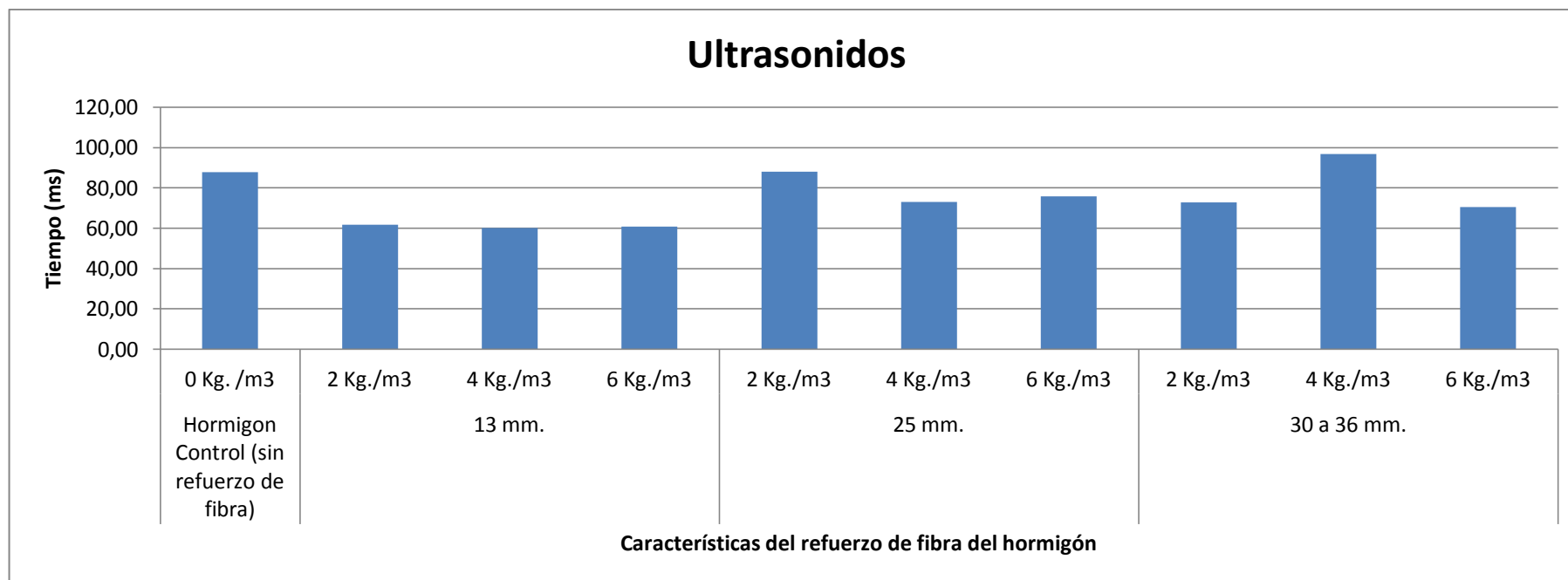
Fig. 37: Gráfico lineal con los resultados del composite al someterlo al ensayo de tracción indirecta

#### 4.5- ENSAYO DE ULTRASONIDOS

Los valores del ensayo de ultrasonidos de forma gráfica son los que se expresan en las Fig. 38 y Fig. 39.



**Fig. 38:** Gráfico lineal con los resultados del composite al someterlo al ensayo de ultrasonidos

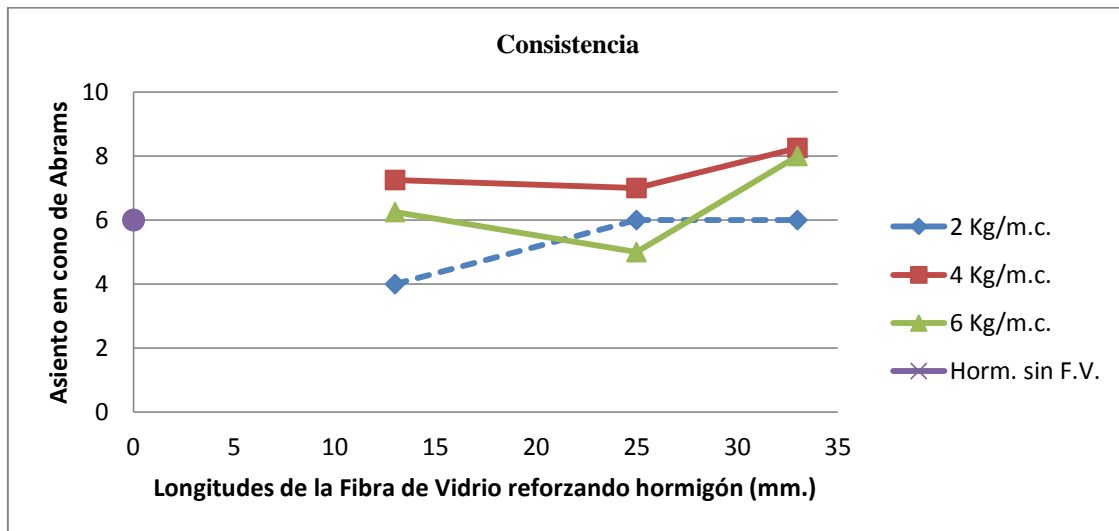


**Fig. 39:** Diagrama de barras con los resultados del composite al someterlo al ensayo de ultrasonidos

En el diagrama de barras de la figura puede apreciarse que las fibras influyen en el ensayo de ultrasonidos a excepción de la dosificación de 2 Kg/m<sup>3</sup> para las fibras intermedias y la de 4 Kg/m<sup>3</sup> para las fibras largas. El resto de resultados se encuentra por debajo del valor del hormigón de control, lo que significa que la onda tarda menos en llegar del emisor al receptor. Se puede asegurar que las fibras favorecen la transmisión de esta onda a excepción de un tipo de hormigón reforzad

#### 4.6- ENSAYO DE CONSISTENCIA

Los resultados del ensayo de consistencia realizados con el hormigón en estado fresco mediante el cono de Abrams reflejaron lo que se muestra en la Fig.40.



**Fig. 40:** Gráfico lineal con los resultados de la consistencia del hormigón en estado fresco

El refuerzo de fibra de vidrio en el hormigón parece no influir de manera clara en la consistencia. En la gráfica puede observarse que existen valores superiores e inferiores al hormigón de control. Si la cantidad de fibras de vidrio añadida es de 2 Kg/m<sup>3</sup>, el valor no supera el del hormigón que se toma como referencia. Para longitudes cortas la consistencia es plástica, mientras que para las intermedias y largas, su consistencia es blanda y exactamente la misma que el hormigón de control. Analizando la curva correspondiente a la dosificación de 4 Kg/m<sup>3</sup>, la consistencia fue blanda para las tres longitudes, el asiento descendió para las fibras intermedias y aumentó para las fibras largas, situándose todos los valores por encima del hormigón de referencia así como también por encima de una dosificación menor. Cuando las fibras adicionadas aumentan en valor de 6 Kg/m<sup>3</sup>, se produce la disparidad de resultados. Para las fibras de 13 mm., la consistencia fue ligeramente superior al hormigón control, pero el valor se situó entre las otras dosificaciones. Si el refuerzo empleado era de 25mm., la consistencia descendía a estado plástico, valor situado por debajo de las otras cantidades de refuerzo. Y por último, al añadir fibras de 30-36 mm., aumenta notablemente el valor resultando una consistencia blanda

#### 4.7- ENSAYO DE AIRE OCLUIDO

El ensayo de aire ocluido, arrojó los siguientes resultados, resumidos en la Fig. 41.

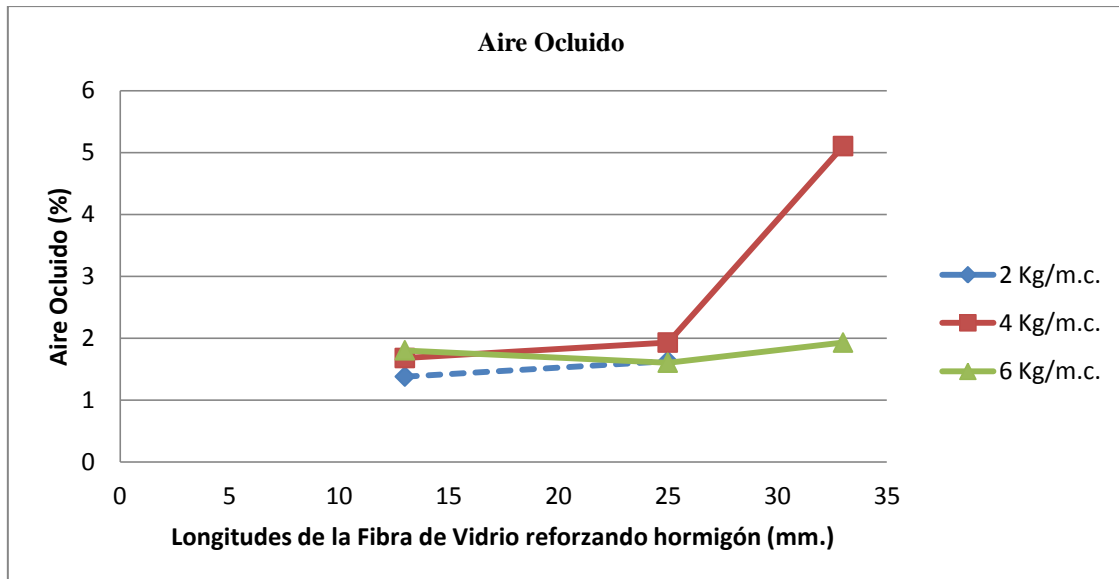


Fig. 41: Gráfico lineal con los resultados del aire ocluido presente en el hormigón en estado fresco

No se pudo realizar este ensayo al hormigón de control por motivos que se explican en el apartado siguiente denominado 'Incidencia' por lo que la comparativa se realiza entre las diferentes amasadas que se ensayaron. Tampoco pudo ensayarse la dosificación de fibras largas en cantidad de  $2 \text{ Kg/m}^3$ .

Se puede afirmar que el porcentaje presente en el hormigón de aire ocluido no depende de reforzar éste con fibras de vidrio. Todos los valores, exceptuando las fibras largas con dosificación de  $4 \text{ Kg/m}^3$ , se encuentran en intervalos muy próximos. Los valores no aumentan a medida que aumentan la dosificación ya que la dosificación de  $6 \text{ Kg/m}^3$  presenta resultados intermedios al resto. Además, el aumento de las longitudes tiene efecto en las dosificaciones menores, sin embargo cuando la dosificación es la mayor, el valor para fibras intermedias es menor que el de las fibras corta y largas, lo que demuestra que el porcentaje de aire ocluido no está estrictamente ligado a la presencia de fibras.

## 5- INCIDENCIAS

Durante la elaboración del estudio ocurrieron una serie de incidencias que se reflejan a continuación.

- No hubo suficiente hormigón de control como para la realización de aire ocluido, por lo que en este ensayo los resultados se compararon con el hormigón reforzado con distintas dosificaciones y longitudes única y exclusivamente.
- Cuando se procedió a la realización del mismo ensayo citado anteriormente para longitudes de 30-36 mm con dosificación de  $2 \text{ Kg/m}^3$ , se produjo la rotura de los enganches del aparato, por lo que no se obtuvieron resultados válidos para esta amasada.
- En el ensayo de resistencia a flexión en tres puntos, se produjeron una serie de contratiempos, por lo que los promedios se realizaron excluyendo estos valores. Estas tres incidencias fueron:

1- Cuando se ensayaba una de las probetas correspondientes al hormigón de control, ésta fracturó antes de tiempo, dando una resistencia demasiado baja debido probablemente a un defecto presente en su interior.

2- Una de las probetas de fibras de 13 mm. y dosificación de  $4 \text{ Kg/m}^3$ , fracturó antes de la realización del ensayo.

3- La segunda probeta ensayada cuya amasada corresponde a un refuerzo de 30-36 mm. en dosificación de  $6 \text{ Kg/m}^3$ , fracturó por una sección distinta al plano de entalla, por lo que el ensayo no se puede dar por válido. La probeta puede verse en la Fig. 40:



**Fig. 40:** Incidencia ocurrida durante ensayo a flexión

- Al someter al ensayo de tracción indirecta a la segunda probeta de hormigón reforzado con fibras de 13 mm. en cantidad de  $2 \text{ Kg/m}^3$ , se observó la presencia de una fibra de acero en su interior (ver Fig. 41).



**Fig. 41:** Incidencia ocurrida por presencia de fibra de acero en composite hormigón con fibra de vidrio AR

- Se trató de realizar el ensayo de Módulo Elástico pero los resultados fueron totalmente descartados por la no uniformidad del valor. Esto se debe a que el refrentado no fue aplicado correctamente, por lo que la tensión aplicada en la

cara de la probeta durante le realización del ensayo no fue uniforme y de ahí que el valor no resultara válido.



**Fig. 41:** Unión deficiente entre el plato y la probeta debido a un mal refrentado de ésta



## 6- CONCLUSIONES

En este apartado se expondrán las conclusiones extraídos de los ensayos estudiados sobre el hormigón reforzado con distintas longitudes y cantidades de fibras. En primer lugar se establecerán unas conclusiones generales y posteriormente las conclusiones específicas, como se estableció al principio de este trabajo en los objetivos.

### 6.1- CONCLUSIÓN GENERAL

La conclusión general es que la presencia de fibra de vidrio AR en el hormigón sí que modifica las propiedades mecánicas que éste posee de manera intrínseca. El composite creado al incorporar al hormigón fibra de vidrio AR, convierte al hormigón en un material con propiedades superiores a las que posee sin ser reforzado.

### 6.2- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

Las conclusiones específicas se dividen en diferentes apartados correspondientes con cada ensayo. Dichas conclusiones son las siguientes:

**COMPRESIÓN:** La resistencia a compresión que presenta el composite se ve aumentada notablemente con la presencia de fibra de vidrio AR en el hormigón. No siendo importante la longitud de las fibras ya que los valores disminuyeron cuando las fibras utilizadas eran de longitud de 30-36 mm..

**FLEXIÓN EN TRES PUNTOS:** El hormigón reforzado con fibra de vidrio AR sometido a flexión presentó unos valores similares a los del hormigón control. La resistencia de las diferentes amasadas presenta valores ligeramente superiores o inferiores a los del hormigón de referencia por lo que la presencia de fibras no mejora de manera regular la resistencia a flexión.

**PENETRACIÓN DE AGUA:** La penetración de agua máxima sí que depende de la presencia de fibras. Ésta es mayor a la del hormigón control cuando la cantidad de fibras se encuentra en valor de  $6 \text{ Kg/m}^3$  y aumenta a medida que aumenta la longitud del refuerzo. Cuando la cantidad es de  $4 \text{ Kg/m}^3$ , la penetración máxima disminuye a medida que se aumenta la longitud de las fibras, siendo sólo el valor de fibras cortas superior al hormigón de referencia.

En la penetración media se ve de manera más clara la variación de las fibras. Todos los valores, exceptuando uno, se encuentran por encima del hormigón control por lo que se afirma que la presencia de fibras, aumenta la penetración de agua media.

**TRACCIÓN INDIRECTA:** Esta propiedad se ve claramente mejorada cuando el hormigón se refuerza con fibras de vidrio AR. Todos los valores obtenidos se encuentran por encima del hormigón de referencia. Los resultados mejores se obtienen para las fibras de 13mm. ya que con las de 25mm. y 30-36 mm. los valores disminuyen.

**ULTRASONIDOS:** La velocidad de propagación de la onda es más cuando el hormigón está reforzado con fibra de vidrio. La presencia del refuerzo crea hormigones menos porosos por lo que la onda no encuentra obstáculos y pasa de manera más “directa” del emisor al receptor.

**CONSISTENCIA:** La consistencia del hormigón en estado fresco se ve modificada por la presencia de fibras. Se dan consistencias mayores (más fluidas) cuando las fibras de vidrio se encuentran en cantidad de  $4 \text{ Kg/m}^3$ . Si la cantidad de fibras es de  $2 \text{ Kg/m}^3$  la consistencia es menor (más seca). La longitud de las fibras también es importante ya que en las tres dosificaciones, el mayor valor se presentó para las fibras largas.

**AIRE OCLUIDO:** En este apartado es más complicado hacer una valoración ya que no existen datos del hormigón de referencia. Se puede afirmar que el porcentaje de aire ocluido aumenta a medida que lo hace la longitud de las fibras. A pesar de que en la dosificación de  $6 \text{ Kg/m}^3$  las fibras de 25 mm. presenten una ligera disminución con respecto de las de 13 mm. pero que luego se ve aumentada en las fibras de 30-36 mm.. La cantidad de refuerzo por unidad de volumen no aumenta el porcentaje de aire ocluido ya que sí que lo hace con la dosificación media de  $4 \text{ Kg/m}^3$  pero disminuye para la mayor de  $6 \text{ Kg/m}^3$ .

## 7- PROPUESTA DE INVESTIGACIONES FUTURAS

Tras realizar la presente investigación, surgen varias ideas acerca de otros aspectos relativos al hormigón reforzado con fibra de vidrio AR, que podrían ser tratados en investigaciones futuras, entre ellos:

- Comparación extensiva de la fibra de vidrio AR y otras fibras para su uso en hormigón.
- Realizar ensayos de módulo elástico con estas mismas dosificaciones y longitudes para comprobar su variación.
- Someter a las mismas probetas empleadas en es este trabajo al ensayo de flexión en cuatro puntos.
- Estudio de la aplicabilidad de este material compuesto en la ejecución de soleras.
- Estudio de la interacción del hormigón reforzado con fibra de vidrio AR con distintos tipos de terrenos.

## 8- BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Águila, V.**, Características Físicas y Mecánicas de Hormigones Reforzados con Fibras de: Vidrio, Carbono y Aramida, *Universidad Politécnica de Madrid*, 2010
- [2] **Bravo, J.P.**, Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de vidrio: Influencia del porcentaje adicionado, *Universidad de Chile*, 2003
- [3] **Enfedaque, A., Cedón, D., Gálvez, F., Sanchez-Gálvez, V.**, Envejecimiento y pérdida de propiedades en los morteros de cemento reforzados con fibras de vidrio (GRC), *Anales de Mecánica de la Fractura, Vol.2*, 2009
- [4] **Enfedaque, A.**, Resistencia a impacto de morteros de cemento reforzados con fibra de vidrio (GRC), *UPM*, 2008
- [5] **Liang, W., Cheng, J., Hu, Y., Luo, H.**, Improved properties of GRC composites using commercial E-glass fibers with new cotanigs, *Materials Research Bulletin*, (37), 2002, 641-646
- [6] **Yan, L., He-ming C., Zhi-guang M.**, Fatigue performances of glass fiber reinforced concrete in flexure, *Procedia Engineering* (31), 2012, 550 – 556
- [7] **Tassew, S.T, Lubell, A.S.**, Mechanical properties of glass fiber reinforced ceramic concrete, *Construction and Building Materials* (51), 2014, 215–224
- [8] **Alsayed, S.H., Al-Salloum, Y.A., Almusallam T.H.**, Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures, *Composites: Part B*, (31), 2000, 555-567
- [9] **Mohammad S., Parviz S., Muhammad M.S., Anagi B., Jue L.**, Low-cost glass fiber composites with enhanced alkali resistance tailored towards concrete reinforcement, *Construction and Building Materials*, (44), 2013, 458–463

[10] AP- 021. Refrentado de Probetas Cilíndricas de Hormigón. Hormigón Endurecido, [www.construmatica.com/construpedia](http://www.construmatica.com/construpedia)