

# APLICACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO. CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO.

Por:

Henry Manuel Cordero Morrobel

Febrero 2015

|  |  |  |   |
|--|--|--|---|
| Autor / Author:<br>Henry Manuel Cordero Morrobel   |  | Fecha / Date:<br>Febrero 2015  |   |
| Título / Title:<br><br>APLICACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO.<br>CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO. |  |  |   |
| Directores del trabajo / Supervisores:<br>Dr. Pedro Serna Ros  |  | Código / Code:<br>CST  | Nº páginas/ pages:<br>107   |
| Departamento / Departament:<br>INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL   |  |  |  |
| Universidad / University:<br>UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA   |  |  UNIVERSIDAD<br>POLITECNICA<br>DE VALENCIA |   |
| Palabras clave / Keywords: Ultra High Performance Concrete, Glass Fibers, fibras de vidrio, hormigón de ultra alta resistencia.  |  |  |   |
| Código Unesco:<br>3305.05 Tecnología del Hormigón 3313.04 Material de Construcción 3312.08 Propiedades de Los Materiales 3305.20 Construcciones ligeras.                     |  |  |   |

**APLICACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO. CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTA RESISTENCIA CON FIBRAS DE VIDRIO.**

**Tesis Final de Master**

Autor:

**Henry Manuel Cordero Morrobel**

Directores:

**Dr. Pedro Serna Ros.**



**UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y  
PROYECTOS DE INGENIERIA CIVIL**

**Valencia (España), 2015**

# Dedicatorias

---

## **A mis padres:**

*Ramón Francisco Cordero Díaz.*

*Ana Lucia Morrobel de la Cruz.*

*Quienes fueron mis pilares en el transcurso de todos mis estudios, sin ellos nada de lo que hoy he logrado fuera posible, les debo todo lo que soy y espero llegar a ser.*

## **A mis Hermanos:**

*Stanley Ramón Cordero Morrobel.*

*Ornelia Lucia Cordero Morrobel.*

*Orneris Lucia Cordero Morrobel*

*Los cuales de una forma u otra siempre estaban presentes cuando los necesitaba.*

## **A mis Tíos:**

*Roberto Antonio Díaz.*

*María Dolores Díaz.*

*Maritza Margarita Cordero Díaz.*

*Quienes se mantuvieron todo el tiempo a mi lado dándome apoyo y fuerza para superar todas mis metas.*

## **A mi Asesor:**

*Dr. Pedro Serna Ros e Ing. Juan Ángel López*

*Quienes se esforzaron para que el trabajo fuera el mejor y siempre con unas manos de ayuda en todos los aspecto del proceso de este proyecto.*

## **A mis Amigos:**

*José Gabriel. (El gran Gaby)*

*Mauricio Sierra. (Colombia)*

*Elvis Flores. (El gordis)*

*Santiago Brito. (El patrón)*

*José Arismendy. (El más loco)*

*Martha Iris.*

*Geovanny Vázquez. (El geo).*

*Sin los cuales mi existencia en la Universidad Politécnica de Valencia no hubiera sido lo mismo siempre estuvieron en las buenas y en las malas. Los considero mi familia.*

# Agradecimientos

---

**A mi madre: Ana Lucia Morrobel.**

*Quien fue y será mi mayor apoyo y fuerza para seguir siendo una mejor persona y lograr alcanzar todas mis metas. Siempre estaré agradecido por todos los esfuerzos y sacrificios que realizo. Con mucho amor y cariño para mi madre.*

**A mi Padre: Ramón Francisco Cordero Díaz.**

*Quien es mi ejemplo a seguir, le agradezco que él se haya convertido en mi norte y al cual le tengo gran admiración y respeto. Con mucho amor para mi padre.*

**A mis Hermanos:**

*Stanley Cordero, Ornelia Cordero, Orneris Cordero. Con Afecto y Cariño.*

**A mis Tíos: Roberto Díaz, María dolores Díaz y Maritza Cordero.**

*Los cuales siempre estuvieron pendientes de mi bienestar y siempre decían presente en cualquier momento en que los necesitara.*

**A mis amigos:**

*José Gabriel, Elvis Flores, José Arismendy, Geovanny Vázquez, Mauricio Sierra, Santiago Brito y Martha Iris. Con afecto.*

**A mis mejores amigo.**

*Aron Abreu Tejeda. Quien siempre estaba ahí preguntando por mi progreso y mi situación le agradezco todo su interés y su disposición a mí por venir. Gracias.*

*Emmanuel Reyes. Uno de los que siempre estará ahí para cualquier cosa, un hermano desde muchos años. Gracias!*

*Rafael Pineda. Un gran amigo y persona que siempre está dispuesto a ayudarme en cualquier cosa gracias. Por el apoyo.*

**A mi s amigos en España.**

*María Isabel, Eduardo Sánchez, Alberto Castilla y Joan Salas fueron y serán unos grandes amigos, sin ellos desconocería muchas cosas de España y valencia.*

# Índice

|   |    |
|---|----|
| <b>Capítulo I</b> .....   | 14 |
| 1. Introducción .....   | 15 |
| 1.1 Antecedentes .....  | 17 |
| 1.2 Objetivos .....   | 23 |
| 1.3 Estructura del Documento .....  | 24 |
| <b>Capitulo II. Estado del arte</b> .....                                 | 25 |
| 2.1 Concepto del UHPC y su relación con otros hormigones especiales ..... | 26 |
| 2.2 Dosificación y materiales del UHPC .....                              | 28 |
| 2.3 Propiedades del UHPC .....  | 32 |
| 2.3.1 Propiedades en estado fresco .....                                  | 32 |
| 2.3.2 Propiedades en estado de endurecimiento .....                       | 34 |
| 2.3.2.1 Compresión .....  | 34 |
| 2.3.2.2 Tracción .....  | 35 |
| 2.2.2.3 Flexión .....   | 37 |
| 2.5 Durabilidad .....   | 39 |
| 2.6 Otras propiedades. ....   | 40 |
| 2.7 Aplicaciones del UHPCFR en la ingeniería .....                        | 42 |
| 2.8 Influencia de las fibras .....  | 45 |
| 2.8.1 Fibras de vidrio. ....  | 46 |
| 2.8.2 Las fibras de vidrio para morteros. ....                            | 49 |
| 2.8.3 UHPC con fibras de vidrio. ....                                     | 54 |
| <b>Capitulo III. Programa Experimental y Metodología.</b> .....           | 58 |
| 3.1 Programa Experimental. ....   | 59 |
| 3.1.1 Propiedades Analizadas. ....  | 60 |
| 3.2 Materiales .....  | 61 |
| 3.2.1. Cemento .....  | 62 |
| 3.2.2 Humo de sílice. ....  | 62 |
| 3.2.3 Harina de cuarzo .....  | 63 |
| 3.2.4 Árido grueso .....  | 63 |
| 3.2.5 Árido fino .....  | 64 |
| 3.2.6 Agua .....  | 64 |

|   |            |
|---|------------|
| 3.2.7 Aditivo .....   | 64         |
| 3.2.8 Fibras de vidrio .....  | 65         |
| 3.2.9 Fibras de acero.....  | 69         |
| 3.2.10 Fibras Sintéticas.....   | 69         |
| <b>3.3 Metodología de ensayos.....</b>  | <b>70</b>  |
| 3.3.1 Proceso de amasado.....   | 70         |
| 3.3.2 Proceso de moldeado .....   | 71         |
| 3.3.3 Proceso de curado.....  | 72         |
| 3.3.4 Proceso para la realización de los ensayos a flexo traccion. ....                           | 73         |
| <b>Capitulo IV. Resultados y Análisis.....</b>  | <b>76</b>  |
| 4.1 Características de las muestras.....  | 77         |
| 4.2. Consistencia y Tiempo de Mezclado. ....  | 78         |
| 4.3 Comportamiento a la rotura.....   | 80         |
| 4.4 Ensayos de resistencia a flexo traccion de probetas curadas a 28 días. ....                   | 82         |
| 4.4.1 Ensayos de resistencia a flexo traccion de probetas curadas a 90 días. ....                 | 87         |
| 4.4.2 Ensayos de resistencia a flexo traccion de probetas con tratamiento de envejecimiento. .... | 92         |
| 4.5 Comparación fibras de vidrio, acero y sintéticas. ....  | 94         |
| 4.5.1 Consistencia y Tiempo de mezclado.....  | 95         |
| 4.5.2 Ensayos de resistencia a flexo traccion fibras de acero y sintéticas. ....                  | 95         |
| 4.6 Ductilidad de las fibras.....   | 99         |
| <b>Capitulo V. Conclusiones y líneas de investigación. ....</b>                                   | <b>103</b> |
| 5.1 Futuras líneas de trabajo.....  | 105        |
| <b>Bibliografía .....</b>   | <b>106</b> |

## Listado de figuras.

---

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. <i>Diferentes familias de hormigones en el entorno del UHPFRC. (Efraím, 2010).</i> .....  | 28 |
| Figura 2. <i>Frecuencia relativa de distribuciones de cemento. En azul, mezclas con árido grueso; en rojo, mezclas sólo con fino (Camacho Torregrosa, 2013)</i> ..... | 29 |
| Figura 3. <i>Frecuencia relativa de contenido de humo de sílice y harina de cuarzo respecto al peso de cemento (Camacho Torregrosa, 2013)</i> .....                   | 30 |
| Figura 4. <i>Relación entre contenido de agua y binder de las mezclas estudiadas (Camacho Torregrosa, 2013)</i> .....   | 30 |
| Figura 5. <i>Relación agua/binder y escurrimiento (Camacho Torregrosa, 2013)</i> .....  | 31 |
| Figura 6. <i>Relación agua/binder (sin considerar la harina de cuarzo) y resistencia a compresión (Camacho Torregrosa, 2013)</i> .....                                | 31 |
| Figura 7. <i>Relación agua/binder resistencia a compresión (Camacho Torregrosa, 2013)</i> .....   | 32 |
| Figura 8. <i>Curva constitutiva a compresión el UHPC con diferentes porcentajes de fibras. (Fehling, 2004)</i> .....  | 35 |
| Figura 9. <i>Comportamiento a tracción directa del UHPFRC (Spasojevic, 2006)</i> .....  | 36 |
| Figura 10. <i>Curva a tensión equivalente-flecha en un ensayo a flexión (Spasojevic, 2006)</i> .....  | 37 |
| Figura 11. <i>Diagrama tensional en zona A (López Martínez, 2012)</i> .....   | 37 |
| Figura 12. <i>Diagrama tensional en zona B (López Martínez, 2012)</i> .....   | 38 |
| Figura 13. <i>Diagrama tensional en zona C (izquierda) y zona D (derecha) (López Martínez, 2012)</i> ..   | 39 |
| Figura 14. <i>Pasarela de Sherbooke. (García, 2013)</i> .....   | 43 |
| Figura 15. <i>Pasarela Sakata Mirai. (García, 2013)</i> .....   | 43 |
| Figura 16. <i>Puente de Gärtnerplatz, en Kassel. (García, 2013)</i> .....   | 44 |
| Figura 17. <i>Wild Bridge en construcción. (García, 2013)</i> .....   | 44 |
| Figura 18. <i>Detalle de los soportes (izquierda), Modelo a escala de la cubierta de la estación de Shawnessy (derecha). (García, 2013)</i> .....                     | 44 |
| Figura 19. <i>Sección típica de una barrera de seguridad tras ser rehabilitada con HMARRF. (García, 2013)</i> .....   | 45 |
| Figura 20. <i>Diferentes tipos de fibras de vidrio.</i> .....   | 50 |
| Figura 21. <i>GFRC Insulated Wall Panels for Modular Housing in Dubai (Mármol Salazar, 2010)</i> .....  | 51 |
| Figura 22. <i>GFRC panels on the Cervantes Convention Centre, StLouis. 2 finishes</i> .....   | 52 |
| Figura 23. <i>Nile City project, Egypt.2 x twin Towers (Mármol Salazar, 2010)</i> .....   | 52 |
| Figura 24. <i>Bridge Parapets, Thailand (Mármol Salazar, 2010)</i> .....  | 53 |
| Figura 25. <i>Vertido de la pasta (Parra-Montesinos, 2012)</i> .....  | 55 |
| Figura 26. <i>Dispositivo de medición de las deformaciones. (Parra-Montesinos, 2012)</i> .....  | 56 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 27. <i>Resultados de ensayo de flexión de cuatro puntos después de envejecimiento acelerado, compuesto 2</i> .....   | 57 |
| Figura 28. <i>Aspecto de Cemento Esfera</i> .....   | 62 |
| Figura 29. <i>Aspecto del Humo de Sílice</i> .....  | 63 |
| Figura 30. <i>Harina de cuarzo SIBELCO Hispania</i> .....   | 63 |
| Figura 31. <i>Árido grueso</i> .....  | 64 |
| Figura 32. <i>Árido fino</i> .....  | 64 |
| Figura 33. <i>Aditivo Sika 225</i> .....  | 64 |
| Figura 34. <i>Fibras de vidrio de 6mm</i> .....   | 66 |
| Figura 35. <i>Fibras de Vidrio de 24 mm</i> .....   | 67 |
| Figura 36. <i>Fibras de Acero</i> .....   | 69 |
| Figura 37. <i>Fibras Macro sintéticas</i> .....   | 69 |
| Figura 38. <i>Fibras Micro sintéticas</i> .....   | 69 |
| Figura 39. <i>Amasadora</i> .....   | 70 |
| Figura 40. <i>Moldes de las placas</i> .....  | 71 |
| Figura 41. <i>Cono de Abrams para morteros</i> .....  | 72 |
| Figura 42. <i>Bañador para tratamiento de acelerado</i> .....   | 73 |
| Figura 43. <i>Prensa Instron</i> .....  | 74 |
| Figura 44. <i>Placa puesta en la prensa</i> .....   | 74 |
| Figura 45. <i>Muestra con medidores de deformación</i> .....  | 75 |
| Figura 46. <i>Ordenador con la gráfica Fuerza-deformación de una muestra</i> .....  | 75 |
| Figura 47. <i>Gráfica de barras fibras vs consistencia</i> .....  | 79 |
| Figura 48. <i>Fibras vs consistencia a diferentes tiempos de mezclado</i> .....   | 79 |
| Figura 49. <i>Fibras de vidrio en la matriz de hormigón</i> .....   | 80 |
| Figura 50. <i>Matriz con fibras de vidrio</i>   |    |
| Figura 51. <i>Fibras de vidrios adheridos en la matriz</i> .....  | 80 |
| Figura 52. <i>Fisura en muestra con fibras de vidrio de 36 mm</i> .....   | 81 |
| Figura 53. <i>Fisura en muestra con fibras de vidrio de 36 mm</i> .....   | 81 |
| Figura 54. <i>Fisura en muestra con fibras de vidrio de 36 mm</i> .....   | 81 |
| Figura 55. <i>Muestra de UHPC sin refuerzo ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación</i> .....   | 82 |
| Figura 56. <i>Muestra con fibras de 36 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación</i> .....  | 83 |
| Figura 57. <i>Izquierda muestra con fibras de 6 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 12 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación</i> ..... | 84 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 58. <i>Izquierda muestra con fibras de 12 mm AC ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 18 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación.</i> ..... | 84 |
| Figura 59. <i>Izquierda muestra con fibras de 24 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 36 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación.</i> .....    | 84 |
| Figura 60. <i>Capacidad de carga de las muestras a 28d con 1% de fv en su dosificación.</i> .....  | 85 |
| Figura 61. <i>Muestra con fibras de 36 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación.</i> .....  | 85 |
| Figura 62. <i>Izquierda muestra con fibras de 6 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 12 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación.</i> .....     | 86 |
| Figura 63. <i>Izquierda muestra con fibras de 12 mm AC ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 18 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación.</i> ..... | 86 |
| Figura 64. <i>Izquierda muestra con fibras de 24 mm AC ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 36 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación.</i> ..... | 86 |
| Figura 65. <i>Capacidad de carga de las muestras con 1% y 2% de fv en su dosificación.</i> .....   | 87 |
| Figura 66. <i>Muestra con fibras de 36 mm curada a 90 días con 1%.</i> .....   | 88 |
| Figura 67. <i>Izquierda muestra con fibras de 6 mm AC ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 12 mm ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación.</i> .....  | 89 |
| Figura 68. <i>Izquierda muestra con fibras de 12 mm AC ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 18 mm ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación.</i> ..... | 89 |
| Figura 69. <i>Izquierda muestra con fibras de 24 mm ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 36 mm ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación.</i> .....    | 89 |
| Figura 70. <i>Capacidad de carga de las muestras a 90d con 1% de fv en su dosificación.</i> .....  | 90 |
| Figura 71. <i>Izquierda muestra con fibras de 6 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 12 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación.</i> .....     | 90 |
| Figura 72. <i>Izquierda muestra con fibras de 12 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 18 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación.</i> .....    | 91 |
| Figura 73. <i>Izquierda muestra con fibras de 24 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 36 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación.</i> .....    | 91 |
| Figura 74. <i>Capacidad de carga de las muestras curadas a 28 d y 90 d con dosificación de 1% y 2%.</i> .....  | 92 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 75. Izquierda muestra con fibras de 6 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado, derecha muestra con fibras de 12 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado. ....     | 93  |
| Figura 76. Izquierda muestra con fibras de 12 mm AC con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado, derecha muestra con fibras de 18 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado. .... | 93  |
| Figura 77. Izquierda muestra con fibras de 24 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado, derecha muestra con fibras de 36 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado. ....    | 93  |
| Figura 78. Consistencia a diferentes tiempos de fraguado. ....   | 95  |
| Figura 79. Muestra con fibras de acero ensayadas a 28d con 1% de fv en su dosificación. ....   | 96  |
| Figura 80. Muestra con fibras de acero ensayadas a 28d con 2% de fv en su dosificación. ....   | 96  |
| Figura 81. Muestra con fibras Macro sintéticas ensayadas a 28d con 2% de fv en su dosificación. ....   | 97  |
| Figura 82. Muestra con fibras Micro sintéticas ensayadas a 28d con 0,5% de fv en su dosificación. ....   | 98  |
| Figura 83. Muestra con todas las fibras ensayadas a 28d. ....  | 98  |
| Figura 84. Ductilidad muestras curadas a 28 días con 1% de contenido. ....   | 99  |
| Figura 85. Ductilidad muestras curadas a 28 días con 2% de contenido. ....   | 99  |
| Figura 86. Ductilidad muestras curadas a 90 días con 1% de contenido. ....   | 100 |
| Figura 87. Ductilidad muestras curadas a 90 días con 1% de contenido. ....   | 100 |
| Figura 88. Ductilidad muestras curadas con tratamiento de envejecimiento acelerado. ....   | 101 |
| Figura 89. Ductilidad de las muestras curadas a diferentes edades y con diferentes contenidos de fibra. ....   | 101 |
| Figura 90. Comparación de la ductilidad de todos los tipos de fibras utilizadas. ....  | 102 |

## Listado de Tablas.

---

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. <i>Grupos de investigación internacionales en UHPC más relevantes. (López Martínez, 2012)</i> | 19 |
| Tabla 2. <i>Coefficientes de fluencia de un HMARRF. (Interim Recommendations, 2012)</i>                | 41 |
| Tabla 3. <i>Propiedades de las fibras de vidrio. (Morales Ortuño, 2008)</i>                            | 48 |
| Tabla 4. <i>Propiedades del GRFC. (Mármol Salazar, 2010)</i>   | 50 |
| Tabla 5. <i>Tipos de fibras.</i>   | 59 |
| Tabla 6. <i>Contenido de fibras según el tipo de fibra.</i>  | 60 |
| Tabla 7. <i>Tabla Programa.</i>  | 61 |
| Tabla 8. <i>Dosificación del HMAR con fibras.</i>  | 62 |
| Tabla 9. <i>Tipos de fibras de vidrio.</i>   | 65 |
| Tabla 10. <i>Características y propiedades de las fibras.</i>  | 68 |
| Tabla 11. <i>Características mecánica de la amasadora.</i>   | 71 |
| Tabla 12. <i>Características de las probetas.</i>  | 77 |
| Tabla 13. <i>Consistencia de las diferentes tipos de fibras.</i>                                       | 78 |
| Tabla 14. <i>La dosificación se expresa en por ciento del volumen total.</i>                           | 94 |
| Tabla 15. <i>Consistencia y dosificación en las muestras.</i>  | 95 |

# Resumen

---

Un Ultra High Performance Reinforced Glass-Fibre Concrete se ha desarrollado con el objetivo de ver la incorporación de fibras de vidrio en la matriz del UHPC y analizar sus efectos. El UHPC ofrece grandes ventajas tanto en la resistencia, durabilidad y superficie de acabado. Con la incorporación de las fibras de vidrio se busca mejorar las propiedades del UHPC.

Desde varias décadas el hormigón ha ido evolucionando desde el hormigón tradicional, hormigón con fibras, hormigón autocompactante y hormigón de altas prestaciones hasta llegar a lo que actualmente se conoce como Hormigón de Muy Altas Resistencias (HMAR) o Ultra High Performance Concrete (UHPC).

Se ha desarrollado una investigación experimental incorporando diferentes tipos de fibras y teniendo como objetivo las fibras de vidrio y tomando de referencias las fibras de acero. Se han realizado más de cincuenta espécimen de 300X150X20mm los cuales se han sometidos a ensayos de flexo traccion con el método de flexión a 4 puntos. El programa experimental se formó de 2 bloques en los cuales se analizaban diferentes propiedades de las muestras con UHPRFC tanto en estado fresco como endurecido.

Los resultados obtenidos muestran que el Ultra High Performance Reinforced Fibers Concrete aumenta sus prestaciones con la incorporación de fibras. Las fibras de vidrio aumentan la resistencia y la ductilidad del UHPC sin alterar la trabajabilidad de la pasta con lo cual se mantiene un comportamiento de hormigón autocompactante. Por otra parte la durabilidad de las fibras de vidrio se ha visto afectada con el paso del tiempo pero todavía ofrecían mejores prestaciones que el UHPC sin fibras. Las fibras de acero y las fibras sintéticas mostraron mejoras, por una parte las fibras de acero incrementaban de manera muy elevada las resistencia y la ductilidad de las muestras incluso superando a las muestras con fibras de vidrio, sin embargo las sintéticas se veían más relegada en todas las propiedades analizadas.

# Abstract

---

An Ultra High Performance Fibre Glass Reinforced Concrete has been developed in order to see the addition of Glass fibers in the matrix of UHPC and analyze their effects. The UHPC offers great advantages in strength, durability and surface finish. The addition of glass fibers is to improve the properties of UHPC.

For decades the concrete has evolved from traditional concrete, fiber concrete, Self-Compacting concrete and high performance concrete to become what is now known as Ultra High Resistance Concrete (HMAR) or Ultra High Performance Concrete (UHPC).

Has developed an experimental investigation incorporating different types of fibers and with the objective of the glass fibers and taking as reference steel fibers. There have been more than fifty 300X150X20mm specimens which have been subjected to tensile bending tests with bending 4-point method. The experimental program was composed of two blocks in which different properties of samples with UHPRFC both fresh and hardened state were analyzed.

The results showed that the Ultra High Performance Fibers Reinforced Concrete (UHPRFC) increases its performance by incorporating fibers. Glass fibers increase the strength and ductility of UHPC without changing the workability of the dough whereby a Self-Compacting concrete behavior remains. Moreover the durability of the glass fibers has been affected over time but still offered better performance than the UHPC without fibers. Steel fibers and synthetic fibers showed improved, first steel fibers consumption rose from very high so the strength and ductility of the samples even surpassing the samples with glass fibers, however synthetic looked more relegated all properties analyzed.

# Capítulo I.

---

# 1. Introducción

---

El Ultra High Performance Concrete (UHPC) es un material innovador el cual otorga grandes propiedades mecánicas y de durabilidad, este material se ideó con la idea de mejorar tres importantes aspectos en la construcción con hormigón, como son las propiedades mecánicas, durabilidad y la trabajabilidad.

En el ámbito de la ingeniería civil este es un material idóneo debido a su gran capacidad de resistir esfuerzos con lo cual se puede obtener un sin número de nuevas aplicaciones tanto en la ingeniería civil como en la arquitectura ya que con este material se reduce considerablemente el volumen y espacio que normalmente abarcaría un hormigón tradicional.

El UHPC puede mejorar sus propiedades con la incorporación de fibras en su dosificación con lo que apunta a ser el material idóneo para cualquier tipo de ambiente y en cualquier parte del mundo.

El UHPC reforzado con fibras ha creado nuevas líneas de investigación y grupos de investigaciones en el mundo como es el grupo del Dr. Pedro Serna Ros en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) este es un grupo de investigación que desarrolla trabajos sobre hormigones especiales. Dentro de todas las líneas de trabajo que tienen se encuentra la del estudio del UHPC con la incorporación de fibras.

En la actualidad hay una gran gama de fibras que son aplicables para la creación de nuevos materiales en el ámbito de la construcción. Se tienen los siguientes tipos de fibra:

- Fibras de acero
- Fibras poliméricas
- Otras fibras inorgánicas

De las fibras ya mencionadas hoy en día las más estudiadas son las fibras de acero ya que son el material tradicional con el que se conforma el hormigón armado. Se estudia el efecto de estas en la dosificación del UHPFRC.

La incorporación de fibras de acero en el Ultra High Performance Concrete (UHPC) ha sido una de las líneas de investigaciones de más auge debido a la mejora que aporta este material, por otra parte la combinación de UHPC con otras fibras se ha visto un poco más relegada.

Este estudio se basara en analizar la contribución de las fibras de vidrio en el UHPC, ver, estudiar y observar que cambios y alteraciones estas producen en el material teniendo mayor énfasis en los comportamientos de resistencia, durabilidad y trabajabilidad.

Las fibras de vidrio es un material que se obtiene del vidrio como filamento. Hay varios tipos de fibras de vidrio las cuales se clasifican según el tipo de vidrio que se use para fabricarla y también el tratamiento que se le aplique. En la ingeniería, las fibras de vidrios se ven limitadas por dos aspectos, la durabilidad debido a que son afectadas por los álcalis y que son muy frágiles.

Para mejorar en el aspecto del ataque por los álcalis se han creado las fibras de vidrio resistente al ataque por álcalis (AR).

El uso óptimo de este material, con el total aprovechamiento de sus propiedades, permitiría obtener estructuras con unas características tales como ligereza, esbeltez, atractivo estético, delicadeza, diafanidad y todas ellas más achacables a las estructuras metálicas que no a las de hormigón. De ahí que para asegurar un futuro al UHPCFR en su aplicación ingenieril sea imprescindible dirigir las investigaciones hacia nuevas formas estructurales más eficaces y hacia el desarrollo de procedimientos constructivos realizables, para ello tendría como fin último hacer del UHPCFR un material económicamente rentable y, por consiguiente, su comercialización seria inmediata. Este proyecto, sin ánimo de parecer una pretensión o vanidosa, espera poder contribuir de alguna forma a ello.



## 1.1 Antecedentes

---

Uno de los avances más importantes del hormigón al final del siglo 20 fue el desarrollo del Ultra High Performance Concrete (UHPC) con resistencia a la compresión y resistencia a la flexión más allá de 160 MPa y 30 MPa, respectivamente; notable mejora en la trabajabilidad; durabilidad; ductilidad y tenacidad comparable a la del acero. Si bien en las últimas dos décadas una enorme cantidad de trabajos de investigación se han llevado a cabo por académicos e ingenieros de todo el mundo, su uso en la industria de la construcción sigue siendo limitado.

Actualmente no se encuentra mucha información acerca de este material ya que no hace mucho tiempo que se comenzó a utilizar el término de hormigón de altas prestaciones o de alto rendimiento. Este material ha ido evolucionando para llegar a ser hoy en día una combinación de otros hormigones especiales los cuales tienen como objetivo la mejora de las prestaciones del elemento a construir. El Ultra High Performance Concrete Reinforced Fibers (UHPCRF) es una combinación de otros tipos de hormigones como son los hormigones autocompactable, hormigón de alto rendimiento y hormigón con fibras.

El UHPCRF es un material que podría abarcar una gran gama de aplicaciones en la ingeniería civil debido a los beneficios que nos ofrecen los dos materiales.

Preparados inicialmente en Francia en los años 1980 este producto se desarrolló para responder al alarmante deterioro de muchos puentes y carreteras de hormigón (Camacho Torregrosa, 2013).

Desde que se dio a reconocer como un nuevo material por Richard & Cherezy en 1995, los trabajos realizados en laboratorio han ido dirigidos, en un primer momento, a caracterizar sus parámetros químicos y físicos para optimizar los mecánicos que lo doten de las cualidades que potencien su empleo: trabajabilidad, resistencia, durabilidad, economía, ligereza... Las líneas de investigación han continuado determinando las aplicaciones que permitan a la ingeniería civil beneficiarse de dichas cualidades de la manera más eficiente.

En Canadá, el primer puente de UHPC fue construido en 1997, este puente peatonal consiste en un prefabricado, armadura espacial postensada. Al menos 26 puentes se han construido en Canadá utilizando UHPC en uno o más componentes.

En 2002, se publicaron las primeras recomendaciones sobre el uso de UHPC en estructuras en Francia. Este documento inicial se dirigió a las propiedades mecánicas, el diseño estructural y la durabilidad. Desde 2002, varios puentes se han construido en

Francia usando UHPC. En 2009, varios periódicos publicaron en francés cambios a las recomendaciones recomendada.

En Alemania, un programa de investigación de 12 millones de euros sobre el UHPC financiado por la Fundación Alemana de Investigación, serie de 34 proyectos de investigación en más de 20 institutos de investigación en Alemania. El propósito del programa es elaborar en el básico conocimiento para que las normas técnicas confiables pudieran desarrollarse. El objetivo era hacer UHPC un material fiable, comúnmente disponible, económicamente viable y que se aplique con regularidad. Varios puentes que utilizan UHPC se han construido en Alemania.

El Ultra High Performance Concrete (UHPC) en su forma actual se empezó a comercializar en Estados Unidos alrededor del 2000 la Federal Highway Administration (FHWA) comenzó a investigar el uso de UHPC para infraestructura de carretera en 2001 y ha estado trabajando con el departamento de transporte para implementar la tecnología desde 2002. La utilización del UHPC se ha visto en varias aplicaciones como en puentes, incluidos los prefabricados, vigas pretensadas; waffle prefabricado paneles de tableros de puentes; y como material de unión entre los paneles y la cubierta de hormigón prefabricado vigas y entre las alas de vigas adyacentes. Al mismo tiempo, el trabajo de investigación ha sido llevando a cabo en varias universidades de los Estados Unidos (López Martínez, 2011).

La elevada durabilidad del UHPC, junto con la reducción de la cantidad total de materiales, la utilización de residuos industriales y la reducción de los costes de mantenimiento, provocan un aumento de la vida útil de las infraestructuras y la reducción de los impactos de éstas sobre el medio ambiente.

Además, las cada vez más numerosas aplicaciones e investigaciones que se han desarrollado en las diversas partes del mundo, han mostrado que un empleo adecuado de este material en infraestructuras conduce a una mejora en la economía de las soluciones y a un incremento de las condiciones de seguridad de las mismas, no sólo en los momentos posteriores a la ocurrencia de un fenómeno natural catastrófico sino en cada instante de su vida útil. De esta forma, se crean unas condiciones de seguridad más elevadas y un entorno más sostenible (Ahlbron, 2012).

La posibilidad de industrialización y desarrollo de productos prefabricados de UHPC de gran ligereza y elevado valor añadido permite la salida de esta industria hacia mercados exteriores, fomentando la exportación de los productos producidos (López Martínez, 2012). Es por todo ello, que durante los últimos años ha aparecido un incremento de la producción científica en el UHPC, convirtiéndose en una de las líneas de investigación

más prolíferas en el ámbito de la arquitectura y la ingeniería civil. Y así ha quedado demostrado con la reciente formación de grupos de investigación específicos del UHPC en todo el mundo.

En Europa, los grupos de investigación que más han contribuido al desarrollo del UHPC se muestran en la tabla 1:

**Tabla 1** Grupos de investigación internacionales en UHPC más relevantes. (López Martínez, 2012)

| Grupos de investigación                 | Objetivos y contribuciones  |
|---|---|
| FIB-Task Group 8.6                      | Objetivo de establecer unos códigos de diseño de las estructuras en UHPC  |
| AFGC Working Group on UHPFRC            | Ha recopilado las numerosas aplicaciones realizadas en estas últimas dos décadas para crear en 2002 las primeras Recomendaciones Internacionales para el cálculo del UHPC cuya nueva versión estará disponible en un corto período de tiempo.     |
| University of Kassel, Alemania          | Ha llevado a cabo periódicamente y cada cuatro años los Congresos Internacionales en UHPC que se iniciaron en 2004.<br>Esta universidad coordina el programa de investigación promovido por la German Research Foundation (DFG) en UHPC de 12 M€. |
| Delft University of Technology, Holanda | Ha dirigido importantes Tesis Doctorales en el ámbito del UHPC además de aplicaciones innovadoras que han puesto de manifiesto las propiedades durables del material.   |
| Graz University of Technology           | Aplicaciones estructurales en UHPC  |

En Estados Unidos, la Federal Highway Administration (FHWA) mostró su interés en el UHPC desde los inicios del material en la década de los 90', creando un plan para la mejora de la vida útil de sus estructuras transporte y disminución de los costes del mantenimiento mediante el uso del UHPC. Más tarde, ya en 2010 surge el North American UHPC Working Group (NA-WG) que presiona para que en el verano de 2011 el ACI cree el

comité técnico 239 del UHPC. Además, por sus contribuciones destacan las siguientes universidades:

- ✓ University of Michigan
- ✓ Michigan Technological University
- ✓ University of Connecticut
- ✓ Iowa State University
- ✓ Virginia Tech University

En Japón ha habido una alta inversión en aplicaciones con UHPC, fundamentalmente pasarelas que les ha permitido publicar las primeras recomendaciones japonesas del material desarrolladas fundamentalmente por la Universidad de Tokyo y la empresa Taisei Corporation. Han aparecido además unas recomendaciones alemanas y otras australianas.

Además, en España se ha realizado, mediante el uso de una patente francesa del material, el relleno de los pilares metálicos del Museo Reina Sofía. Por otro lado, las universidades politécnicas de Madrid, Barcelona y Ciudad Real, y sobre todo, la de Valencia han comenzado diversos trabajos relacionados con el UHPC.

A pesar de que numerosas empresas cementeras en el mundo versan gran parte de sus trabajos de investigación en la obtención de hormigones de alto rendimiento, por el momento se comercializan dos patentes de UHPC por compañías asociadas: BSI/CeracemR y los diferentes rangos de Ductal.

BSI son las siglas francesas de “Hormigón Industrial Especial” y su desarrollo se inició en 1996. BSI/CeracemR ha sido patentado por Sika y Eiffage, y su resistencia a compresión puede llegar a los 200 MPa. La composición en seco a la venta incluye la dosificación de cemento, humo de sílice, árido fino y a diferencia del resto incluye árido grueso en su dosificación. En su utilización se le añade superplastificante, agua y el porcentaje de fibras de acero y/o sintéticas que requiera la aplicación. Si son de acero se incluyen en un 2.5% en volumen (de 20 mm de longitud y 0.3 mm de diámetro si son de acero) (García, 2013).

Ductal es una gama de UHPFRC desarrollado por Bouygues, Lafarge y Rhodia. Su resistencia a compresión varía entre los 180 y los 225 MPa. Ductal-FM contiene un 2% en volumen de fibras cortas de acero (13 mm de longitud y 0.2 mm de diámetro) por lo que es un ejemplo de “Reactive Powder Concrete” (RPC). Además incluye harina de cuarzo y como adición activa humo de sílice.

Otra tipología son los UHPCFR híbridos, es decir, aquellos que contienen fibras largas y cortas, ambas de acero de alto límite elástico,  $f_y=2500$  MPa, combinadas en una mezcla conjunta con el cemento. Internacionalmente se conocen como Multi-Modal Fiber Reinforced Concrete (MMFRC) o simplemente Hybrid-Fibre Concrete (HFC) y resultan ventajosos porque además de la ductilidad, la resistencia a tracción también se ve incrementada. Las fibras cortas (longitudes menores que 20 mm y rectas) cierran las microfisuras múltiples que se forman en la fase inicial de las pruebas de carga a tracción por lo que se alcanzan mayores picos de resistencia y deformaciones menores.

Las fibras largas (longitudes de 20 a 40 mm y con ganchos en sus extremos) hacen que el comportamiento sea dúctil en la fase posterior de macrofisuración del material. Con todo, la acción conjunta de las fibras hace que se observe un comportamiento sinérgico en los HFC.

Como en cualquier hormigón, la dosificación depende de la aplicación que se le vaya a dar al UHPCRF. Las principales diferencias las encontramos en las cantidades y tipos de fibras empleadas y, además de cemento, agua y fibras, usualmente contendrá arena, adición activa y superplastificante:

- la eliminación del árido grueso mejora la homogeneidad,
- las fibras mejoran la ductilidad,
- la optimización de la distribución granulométrica mejora la compactación
- la adición activa y la baja relación agua/conglomerante mejoran las propiedades de la matriz.

La mezcla se realiza de modo que la densidad de empaquetamiento de las partículas sea lo más elevada posible sin penalizar la movilidad de las mismas, es decir, obteniendo un esqueleto flexible a nivel de microestructura que hace que la mezcla sea fluida a nivel macroscópico. Además, optimizar la densidad de empaquetamiento permite bajar la relación a/c e incrementar así la resistencia.

Como se puede intuir, en la mayoría de las tipologías de UHPCRF se prescinde del árido grueso ya que confiere excesiva rigidez a la microestructura e insuficiente homogeneidad a la mezcla. En los casos en que se incluye el árido grueso en la dosificación para reducir costes porque los requisitos mecánicos de la aplicación lo permiten, este tendrá un tamaño máximo de 8 mm y será de alta resistencia. El árido fino, sin embargo, es imprescindible, y hace que la mezcla esté más confinada reduciendo las discontinuidades de material, de modo que mantienen los valores de resistencia a compresión altos. Así, se suelen usar tamaños de árido no superiores a 2mm (de 0,125 mm a 2mm), y todos ellos de buenas

propiedades como alta resistencia y baja absorción. Por eso el árido silíceo es el más utilizado.

Por su parte, los contenidos de cemento sobrepasan los 700 kg por m<sup>3</sup>, pudiendo llegar hasta los 1300 kg por m<sup>3</sup> [3]. Esta es una de sus características que más incrementa el coste, además de variar la trabajabilidad y los fenómenos de retracción y fluencia con respecto a los hormigones tradicionales.

Se suelen utilizar cementos resistentes a sulfatos (es decir, bajo contenido de C<sub>3</sub>A) y con bajo calor de hidratación. Es común, por tanto, usar cementos Portland: el CEM I 52.5 SR permite obtener resistencias a compresión mayores mientras que el CEM I 42.5 SR tiene una menor retracción. También se opta por sustituir parte de CEM I por CEM III, cemento con escorias de alto horno difíciles de obtener en el mercado (Camacho Torregrosa, 2013).

## 1.2 Objetivos

---

Los objetivos principales que se persiguen en este trabajo de investigación son los que se describen a continuación:

### **Objetivo general.**

Analizar la eficiencia de las fibras de vidrio cuando son incorporadas a un hormigón de ultra alta resistencia.

### **Objetivos específicos.**

- Analizar el efecto de las fibras de vidrio en el hormigón de ultra alta resistencia en estado fresco. Teniendo en cuenta la idea de que el hormigón trabaje como autocompactante y considerando la incorporación de diferentes tipos de fibras.
- Observar los efectos de las fibras en el UHPC en estado endurecido a través de ensayos a flexo tracción de probetas curadas a 28, 90 días y probetas con envejecimiento acelerado.
- Analizar los efectos de las fibras de vidrio en la ductilidad y la durabilidad de las muestras.
- Comparación de UHPC con fibras de vidrio, fibras de acero y sintéticas.
- Elección apropiada de contenido de fibras para asegurar una buena fluidez y una unión adecuada entre la fibra y la matriz.

## 1.3 Estructura del Documento

---

El presente documento contiene cinco capítulos ampliamente desarrollados que constituyen el cuerpo sustancial del estudio en los que se justifica y se desarrolla la investigación. Estos cinco capítulos, claramente diferenciados por su contenido son:

1. Introducción.
2. Estado del Arte.
3. Programa Experimental y Metodología.
4. Resultados y Análisis.
5. Conclusiones y futuras líneas de investigación.

Estos cinco capítulos se convierten en el eje central del documento en el que se recogen toda la información obtenida, la descripción de los procesos realizados y los resultados obtenidos.

El capítulo I estará compuesto por tres componentes: Antecedentes de la investigación que se realizara, los objetivos que se buscan con el desarrollo de este estudio y un apartado en el cual se define la estructura del documento.

El capítulo II se conformara por los siguientes acápite introducción y definiciones, propiedades del UHPC, aplicaciones del UHPC, fibras de vidrios en el hormigón y por ultimo hormigón de Hormigón de Ultra Alto Rendimiento con fibras de vidrio.

El capítulo III estará desarrollado con dos componentes el programa experimental en el cual se explicara los ensayos, experimentos y variables que se estudiaran, y por otra parte la metodología que se aplicara para la realización de los ensayos y experimentos, se presentaran los pasos, métodos y equipos utilizados a lo largo del estudio.

El capítulo IV se compondrá de los resultados obtenidos del programa experimental y el análisis dispuesto de cada uno de ellos, se presentara los valores de las propiedades analizadas en estado fresco y endurecido. Este capítulo tendrá las figuras de los ensayos de flexo traccion, los valores de la consistencia y la ductilidad de las muestras.

El capítulo V y final es en el cual se presentaran las conclusiones de la investigación, en la cual se pretende resumir de forma sistemática los analices realizados y a las conclusiones a las que se han llegado y también se plantearan las futras líneas de trabajo que puedan aparecer a lo largo del estudio.



# Capitulo II. Estado del arte

---

## 2.1 Concepto del UHPC y su relación con otros hormigones especiales

---

El ACI, define como Hormigón de Alto Desempeño: HAD como “un hormigón que reúne cualidades especiales de desempeño y uniformidad que no se pueden obtener con materiales y prácticas convencionales” (ACI Committee 318, 2011).

La recomendación Francesca de Ultra High Performance Concrete lo define como "Ultra High Performance Concrete Reinforced Fibers "se refiere a materiales con una matriz de cemento y una resistencia a la compresión característica superior a 150 MPa, posiblemente alcanzando 250 MPa, y fibras de acero que contienen con el fin de lograr un comportamiento dúctil menores de diez años y, si es posible, para prescindir de la necesidad de refuerzo pasivo (no pretensado). También pueden contener fibras de polímero (Interim Recommendations, 2012).

El término UHPC se asocia a los hormigones con resistencia característica superior a 150 MPa en probeta cilíndrica, alto contenido de cemento y elevada compacidad que le confiere una muy alta durabilidad (Camacho Torregrosa, 2013). Anteriormente se denominaba UHSC (Ultra High Strength Concrete), pero el primer término es más aceptado actualmente debido a las propiedades adicionales que posee además de la resistencia a compresión.

La historia del hormigón ha experimentado una continua evolución a lo largo de toda su existencia que ha ido variando de acuerdo con las circunstancias locales, el tiempo y el conocimiento.

En la década del 1960 aparecen los hormigones reforzados con fibras, en los años 70' aparece el hormigón de alta resistencia el cual tenía una capacidad de soportar a compresión cargas de 120 a 200 Mpa y por último a finales de los 80' aparece el hormigón autocompactante con el cual se consiguen un conjunto de hormigones especiales capaces de adaptarse a diferentes tipos de ambientes y con capacidad de trabajar para un cierto tipo de diseño. El UHPC se puede decir que es una combinación de estos tres hormigones especiales ya nombrado en los siguientes puntos se desarrollara un poco acerca de estos hormigones para ir conociendo las características que tiene el UHPC.

### ➤ **Hormigón Autocompactante.**

Los hormigones autocompactantes son capaces de fluir en el interior del encofrado o molde, llenándolo de forma natural, pasando entre las barras de armadura y

consolidándose únicamente bajo la acción de su peso propio, sin ayuda de medios de compactación, y sin que se produzca segregación de sus componentes.

➤ **Hormigón de alta resistencia.**

Es un hormigón que presenta una capacidad de carga muy alta a la del hormigón convencional según el ehe se considera un hormigón especial cuando su resistencia es de 50-60-78-80-90 y 100 Mpa. Este hormigón se creó con el objetivo de reducir las dimensiones de los elementos y mejorar la durabilidad de las piezas. La aparición de este hormigón se ha debido al desarrollo de los cementos tanto en finura como en composición, la aparición de los aditivos (sobre todo los reductores de agua) y la utilización del humo de sílice como un producto industrial.

➤ **Hormigón con fibras.**

Los hormigones con fibras se definen como aquellos hormigones que incorporan fibras cortas, aleatorias y discretas en su composición. El hormigón reforzado con fibras según el ACI no es más que un hormigón hecho a partir de cementos hidráulicos, conteniendo áridos finos, gruesos y fibras discretas discontinuas.

Las fibras son empleadas en aplicaciones estructurales en busca de beneficios adicionales en cuantos a reducción de manos de obra, incremento de la durabilidad y reducción o eliminación de los refuerzos tradicionales.

La mayoría de los UHPC contienen fibras, denominándose así UHPFRC. Este nombre es el más extendido en los últimos años. Otros sinónimos son UHPFC (Ultra High Performance Fibre Concrete) UHSFRC (Ultra High Strength), FRUHPC (Fibre Reinforced UHPC) o UFC, utilizado en Japón. Aquellos que además contienen dos o más tipos de fibras se incluyen dentro de la familia de los HFC (hybrid Fiber Concrete), y generalmente se utilizan cuando prima la obtención de una elevada resistencia a tracción-flexión y una mayor ductilidad.

Los hormigones con resistencia a compresión entre 110 y 150 MPa y propiedades comparables a las de los UHPFRC se denominan VHPFRC o HPFRC ([Very] High Performance FRC). Estos materiales, entre los denominados SCFRC (Self-Compacting FRC) y los UHPFRC, ofrecen un campo muy interesante de aplicaciones, ya que pueden proporcionar una muy alta resistencia a flexión con una resistencia a compresión suficiente para los requisitos de la aplicación (Camacho Torregrosa, 2013).

En la figura 1 se puede ver de manera gráfica todos los diferentes tipos de hormigones existentes en una manera muy sencilla. Además, aquellos hormigones que siendo ensayados a tracción directa experimenten una rama de endurecimiento se incluirán

también en la familia de los HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites) (Efraím, 2010).

Muchos HFC pertenecen simultáneamente a la vez a la familia de los VHPFRC y los HPFRCC.

La gran mayoría de los UHPFRC que se utilizan en aplicaciones estructurales son productos patentados como Ductal®, BSI®, BCV®, o CEMTEC® resultantes de la investigación conjunta de universidades y empresas y que han sido utilizados en Japón, Francia, EEUU y Alemania, principalmente.

Por otra parte, hay un número creciente de empresas que realizan dosificaciones propias de UHPFRC con los materiales disponibles en cada región, y adaptándolas a los requisitos de cada aplicación (Efraím, 2010).

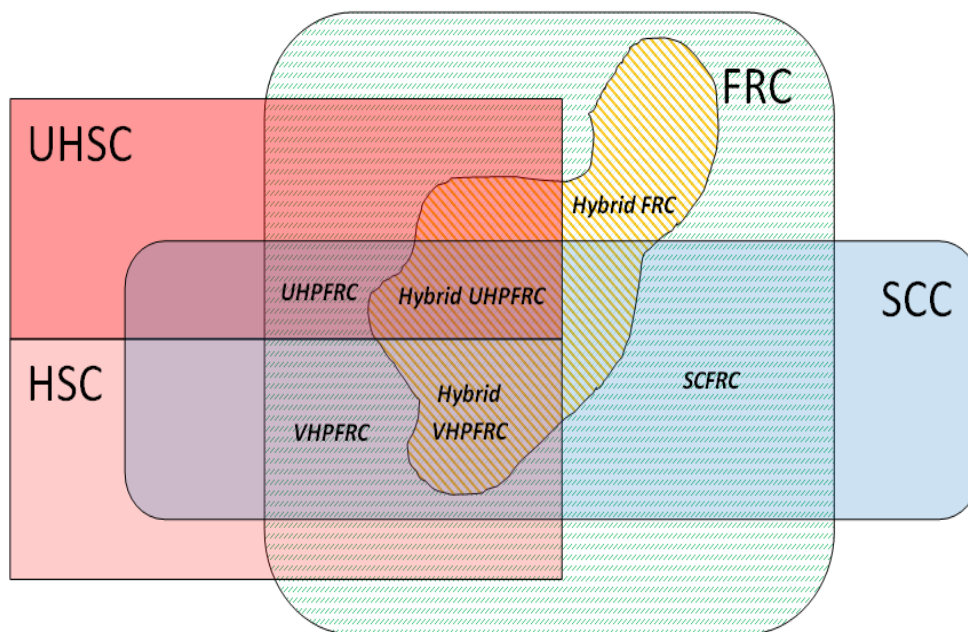


Figura 1.- Diferentes familias de hormigones en el entorno del UHPFRC. (Efraím, 2010).

## 2.2 Dosificación y materiales del UHPC

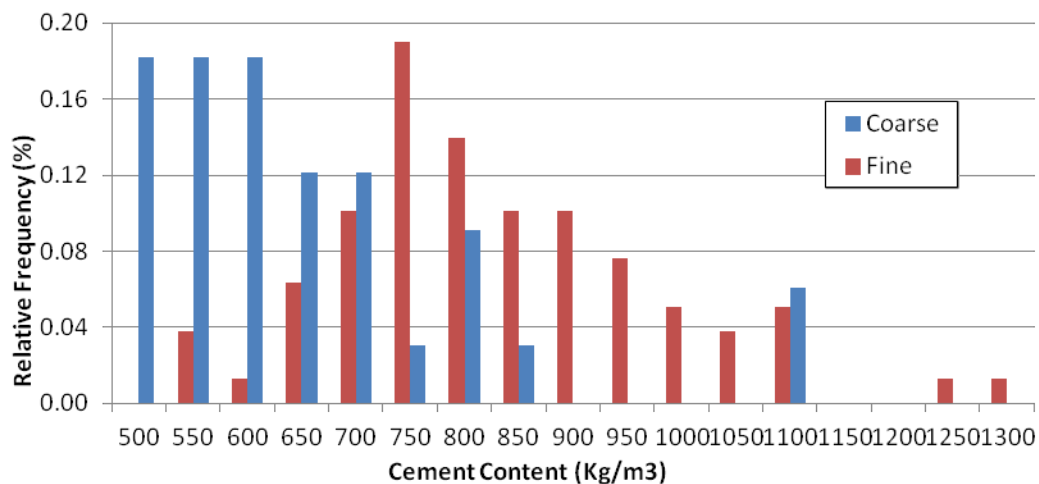
La elaboración del UHPFRC requiere de las siguientes materias primas:

- Elevada cantidad de cemento.
- Adición activa.
- Fibras de alta límite elástico.
- Aditivos superplastificantes de tercera generación.
- Áridos silíceos de pequeños tamaños (<2 mm [JSCE]).
- Puede o no contener harina de cuarzo (filler silíceo).

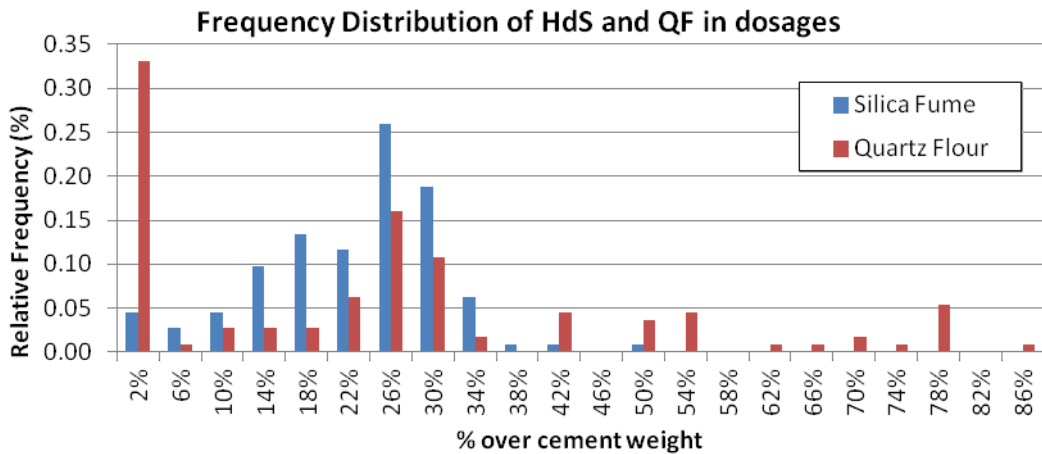
En la UPV (Camacho Torregrosa, 2013) se ha elaborado un estudio amplio de más de 110 dosificaciones, dentro del programa de Tesis Doctoral llevado a cabo por Esteban Camacho, a partir de las dosificaciones empleadas por diferentes autores y que han sido publicadas en congresos y revistas internacionales. Se ha analizado tanto la dosificación, sus propiedades en estado fresco y las resistencias a compresión. Debido a que no se utiliza un ensayo a compresión estándar en el UHPFRC, las resistencias a compresión han sido transformadas con factores de conversión a probeta cúbica de 100 mm. De su análisis se han obtenido muchas conclusiones, algunas de las cuales se resumen a continuación:

- En la gran mayoría de casos los UHPFRC tienen un tamaño máximo de árido inferior a 0.8 mm, si bien las mezclas con árido grueso tienen un tamaño máximo de árido de entre 5 y 8 mm. Estas últimas representan entorno a un 30% del total y siempre utilizan rocas de alta resistencia (basalto, diabasa, bauxita, cuarcita). Se utilizan generalmente dos tipos de arena. Las dosificaciones con árido grueso tienen en torno a un 20% menos de contenido de cemento y proporcionan resistencias comparables. Es necesario tener en cuenta los efectos del árido grueso en las propiedades en estado fresco, así como su interacción con las fibras (Martinie, 2010).

- La proporción de humo de sílice y harina de cuarzo respecto al peso de cemento es de alrededor del 25%. Un 30% de las dosificaciones no contiene harina de cuarzo, por lo que aumentan el contenido de cemento u otras adicciones. En las figuras 2 y 3 se muestra la distribución de frecuencias de los tres componentes para el conjunto de dosificaciones analizadas.

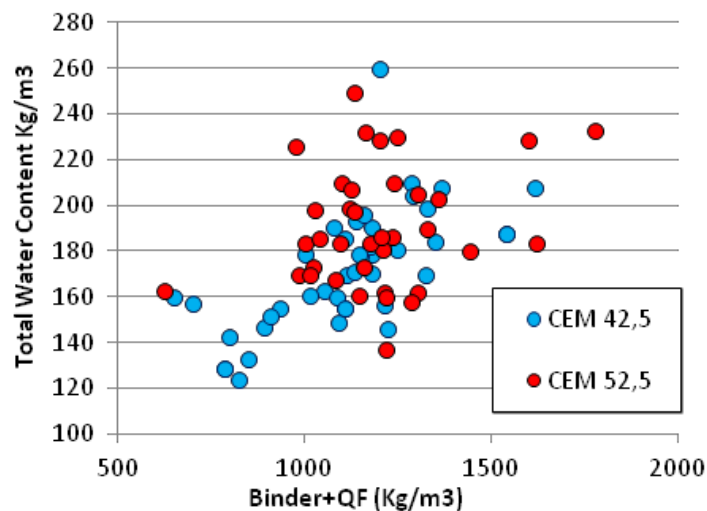


**Figura 2** Frecuencia relativa de distribuciones de cemento. En azul, mezclas con árido grueso; en rojo, mezclas sólo con fino (Camacho Torregrosa, 2013)



**Figura 3** Frecuencia relativa de contenido de humo de sílice y harina de cuarzo respecto al peso de cemento (Camacho Torregrosa, 2013)

•La elección del tipo de cemento es fundamental. Habitualmente se recurre a cementos de clase resistente intermedia para reducir el calor de hidratación y la demanda de agua. El uso de cementos con bajo contenido en A3C puede incrementar la trabajabilidad y tiempo abierto, y favorecer una evolución de resistencias más repartida en el tiempo. Sin embargo, también otros cementos pueden ser adecuados combinados con la adición y PCE apropiados. En la figura 4 y 5 se muestra la demanda de agua y escurrimiento de las dosificaciones estudiadas en función del tipo de cemento según su categoría resistente. Nótese que para demandas de agua similares el escurrimiento es mayor para aquellas que utilizan cemento 42.5.



**Figura 4** Relación entre contenido de agua y binder de las mezclas estudiadas (Camacho Torregrosa, 2013)

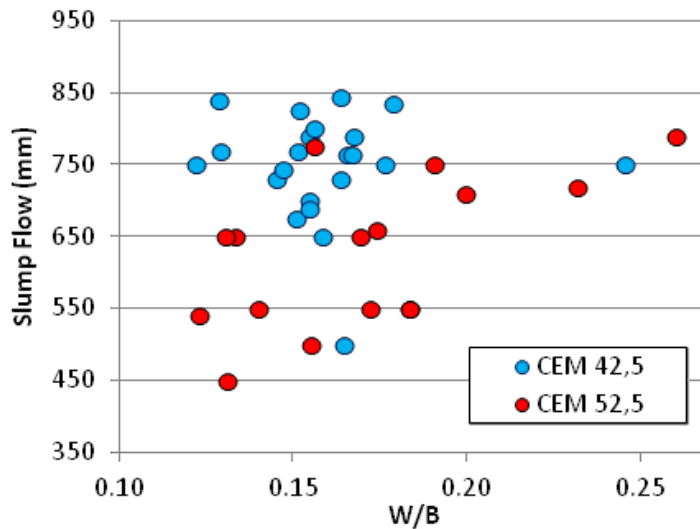


Figura 5 Relación agua/binder y escurrimiento (Camacho Torregrosa, 2013)

•La adición de harina de cuarzo ( $\text{SiO}_2$  cristalina) a las dosificaciones permite reducir el contenido de cemento y complementar la curva granulométrica para los tamaños más pequeños. Tal y como se desprende de las figuras 6 y 7, resulta lógico incluirla como una parte del conglomerante, pues existe más correlación entre la resistencia a compresión y la relación Agua/Conglomerante al considerarla, especialmente si las dosificaciones están curadas al aire.

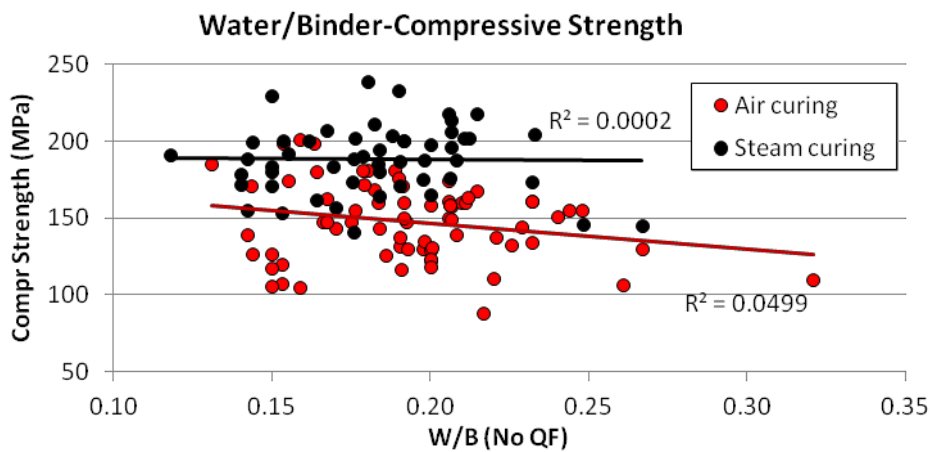


Figura 6 Relación agua/binder (sin considerar la harina de cuarzo) y resistencia a compresión (Camacho Torregrosa, 2013)

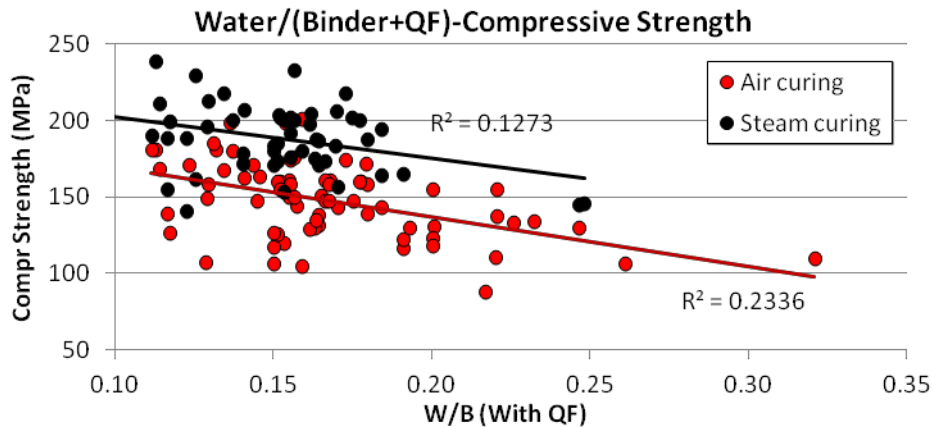


Figura 7 Relación agua/binder resistencia a compresión (Camacho Torregrosa, 2013)

Por otra parte, otra de las claves para obtener un UHPFRC adecuado es la optimización física del esqueleto granular, especialmente los materiales más finos. Las curvas propuestas por Fuller y Bolomey son efectivas en tamaños de entre 500 y el tamaño máximo, siendo inadecuadas para el UHPFRC, donde la mayoría de partículas tienen tamaño inferior. Adoptar estas curvas generaría dosificaciones de baja trabajabilidad y contenido de cemento. La formulación propuesta por Andreasen y Andersen para el ajuste granulométrico es un caso general de la curva de Fuller. El valor propuesto de  $q$  por Andreasen y Andersen para el que obtenían el valor de empaquetamiento óptimo es de 0.37, si bien para UHPFRC son adecuados valores de entre 0.2 y 0.35. (%PasaD: Porcentaje que pasa por el tamiz D).

## 2.3 Propiedades del UHPC

### 2.3.1 Propiedades en estado fresco

El comportamiento reológico de UHPFRC está relacionado con varios parámetros, principalmente la relación  $W/B$ , el contenido de finos, la mezcla y el tipo/contenido de fibras. Las dos primeras variables se pueden considerar con el concepto de la fracción de la pasta en volumen (PVF), que representa el volumen de pasta (aglutinante, harina de cuarzo, mezcla y agua) sobre el volumen total.

Los agregados se consideran flotando en el medio de pasta. Con el aumento del contenido de ellos, la viscosidad de la pasta debe ser menor que para UHPFRC con alta PVF, a fin de lograr el mismo conjunto de destino de las propiedades en estado fresco (López Martínez, 2012).



En una pasta de cemento fluido con fracciones de volumen de fibra bajo, el sistema puede ser considerada semi-diluido ya que no hay contacto a través de los efectos hidrodinámicos. La reología está dominada por la fluidez de la pasta de cemento. Con fracciones de volumen de fibra más altas hay una existencia de una red continua de fibras en contacto, y estos contactos dominan el comportamiento reológico del sistema. Este efecto depende del valor de la fracción de empaquetamiento denso. Entonces, la fracción de volumen y relación de aspecto de las fibras producen una disminución de la trabajabilidad, que puede ser observado con la disminución de la fluidez de asentamiento, o lo que es lo mismo, con el aumento de la tensión de fluencia.

Un criterio de diseño de la mezcla fue proporcionado por (Martinie, 2010) para obtener la cantidad crítica de fibras por encima del cual las fibras forman bolas y el material no es capaz de fluir. Cuanto mayor sea la relación de aspecto de la fibra y la más alta es la fracción de volumen de arena, menor es el contenido de fibra crítica. Esto se considera cualitativamente por muchos investigadores para el diseño de dosificación, ya que aumentan la finura los agregados cuando se requiere alto volumen de fibras. Las dosis típicas UHPFRC contienen entre 1,5% y 2,5% en volumen de fibras, que es ya suficiente para cables en una reducción de la fluidez del hormigón fresco (López Martínez, 2012).

El concepto de segregación incluye todo tipo de separación en grupos de tamaño. La separación se relaciona con las partículas con una alta relación volumen/superficie específica, UHPC es menos susceptible que otros hormigones que padecen, por el hecho de que los finos son de un alto contenido y también la mayor compacidad induce a un mayor contacto entre ellos. Disipador agregados pesados también es menos posible debido a la mayor densidad de la pasta al comparar con el hormigón típico.

Las fibras y también los agregados gruesos en menor medida, podrían establecerse debido a la mayor densidad. Esto tiene que ser controlado y limitando el movimiento del asentamiento, que se relaciona con un valor esfuerzo de fluencia.

La capacidad de llenado está principalmente relacionada con la viscosidad plástica. Se puede estimar el valor de T500 de la prueba de caída de flujo (EN 12350-5) y la prueba de mini-cono, que también se puede utilizar para determinar la evolución trabajabilidad. La capacidad que pasa se puede determinar con las pruebas L- Box y J-Ring. La ausencia de agregados gruesos y la presencia de fibras muy delgadas hacen este último el principal parámetro que controla la capacidad de paso. Para aplicaciones con cubiertas muy reducidas o moldes afilados hormigones híbridos no pueden ser colocados fácilmente por la capacidad de llenado difícil que induce las fibras largas.

Las condiciones para obtener un hormigón autocompactable: la forma de llenado, los métodos de producción, y las influencias a la orientación de las fibras. Se obtiene la mejor orientación de las fibras cuando todas las fibras están en la dirección de los esfuerzos, obteniendo el 100% de su eficiencia. Cuando las fibras son al azar alineadas en dos dimensiones, esta eficiencia se convierte en (63,7%), y cuando las fibras son 3D distribuye al azar la eficiencia es del 50%. Sin embargo, otros autores han demostrado en pruebas de que las fibras inclinadas entre 150 y 300 dan acerca de un 20% mejor respuesta de extracción que los perfectamente alineados (López Martínez, 2012).

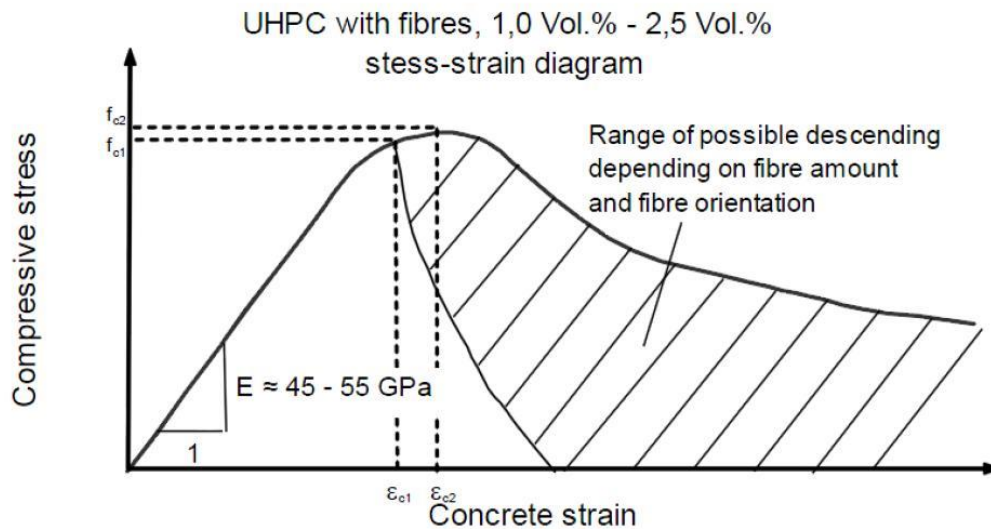
La orientación de la fibra es controlada principalmente por tres parámetros: la gravedad, el efecto de pared y el vector de dirección del flujo. Esto se convierte en una gran razón para diseñar dosificaciones con altas capacidad de fluir, como en ellos la orientación de la fibra puede ser controlada con el flujo UHPFRC. Después de la colada, las Recomendaciones francés sugieren algunas pruebas para verificar la orientación de las fibras en los elementos estructurales de tamaño real, endurecidos, la extracción de una parte de ellos en direcciones diferentes para llevar a cabo ensayos de flexión o tracción posteriores.

## 2.3.2 Propiedades en estado de endurecimiento

### 2.3.2.1 Compresión

La resistencia a compresión de un hormigón normal se encuentran en valores comprendidos entre 28 y 55 MPa aproximadamente; para un HAR los valores ascienden hasta un rango de 83 a 124 MPa. En el caso del UHPC las resistencias se mueven en el rango de a 150-220 MPa existiendo grandes diferencias dependiendo no sólo de las dosificaciones como ya se vio en anteriores puntos, sino por su tratamientos de curado y su porcentajes en fibras (López Martínez, 2012).

La rama elástica a compresión se mantiene hasta un nivel del 70-80% de la carga máxima (Spasojevic). En la figura 8 se puede observar un diagrama a compresión típico del UHPC y su variación de ductilidad en función de la cantidad de fibras presentes.



**Figura 8-** Curva constitutiva a compresión el UHPC con diferentes porcentajes de fibras. (Fehling, 2004)

La resistencia de los HMARRF a los 28 días después de su fabricación, como ya se ha dicho, es mayor que 150 MPa, y su límite superior depende del contenido en fibras y de si se utilizan o no tratamientos térmicos. En este proyecto se harán ensayos con tratamiento de acelerado de calor.

La adquisición de resistencias es un proceso, por lo que el tiempo o edad del hormigón es un factor que influye considerablemente en su resistencia. Esto también sucede en el HC, pero en los HMARRF cobra importancia dado que el contenido en aditivos es significativo y la adquisición de resistencias depende de la clase de aditivos.

De ahí también que los tratamientos térmicos sean muchas veces necesarios, o cuanto menos recomendables sobre todo en las aplicaciones a elementos pretensados de empresas de prefabricados.

### 2.3.2.2 Tracción

En el caso de un UHPC sometido a un ensayo de tracción directa con un contenido de fibras de un 2%, la resistencia a tracción obtenida es del orden de 10-12MPa. Sin embargo, la matriz sin el acompañamiento de fibras es extremadamente frágil. El comportamiento constitutivo típico a tracción directa del UHPC reforzado con la suficiente cantidad de fibras para obtener endurecimiento tras la rotura de la matriz se puede observar en la Figura 9. En ella se pueden distinguir 3 fases (ver figura 9.) claramente diferenciadas como son: una rama elástica, una rama de endurecimiento y una rama de ablandamiento tras la rotura.

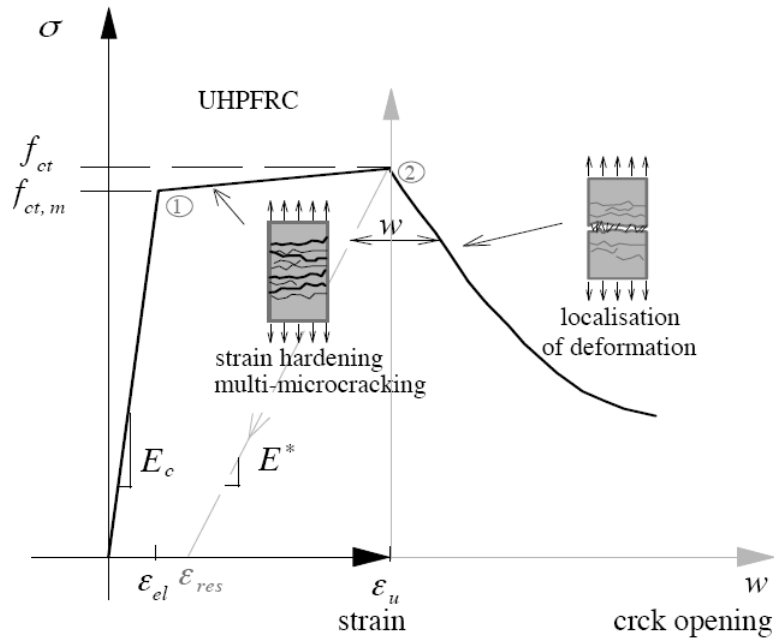


Figura 9. Comportamiento a tracción directa del UHPFRC (Spasojevic, 2006)

Puede alcanzar los 11 Mpa de resistencia característica e incluso mayores para hormigones híbridos con alto contenido en fibras. La mayor resistencia a tracción de este hormigón en comparación con el convencional se explica, sobre todo, por el gran contenido en volumen de fibras en una matriz muy compacta y no tan frágil gracias a las fibras. Por este motivo, se tienen en cuenta las fibras para cuantificar y evaluar el comportamiento del HMARRF.

Esta característica previene la separación de las capas de hormigón que rodean las armaduras activas cuando estas son pretensadas, y permite que no se formen fisuras en los elementos estructurales bajo cargas de servicio. También mejora la rigidez a flexión, lo que supone una reducción de la deformación o flecha y de la abertura de fisura. La tensión equivalente máxima en rotura de los UHPFRC varía entre los 30 y los 50 MPa en un ensayo a flexo-tracción. Las resistencias a flexión o flexo-tracción más elevadas se obtienen con hormigones híbridos de reducidas relaciones  $a/w$  (9). Las fibras cortas permiten obtener picos de resistencia mayores mientras que las fibras largas mejoran la ductilidad. Ello justifica el uso de hormigones híbridos en las aplicaciones con elevados requisitos de resistencia a flexión.

En un ensayo a flexión, y gracias a la presencia de las fibras de acero de alto límite elástico, en el análisis seccional podemos considerar la contribución del hormigón traccionado.

### 2.2.2.3 Flexión

En un clásico ensayo a flexión de un elemento de UHPFRC, realizado a 3 o 4 puntos, se pueden distinguir 3 zonas caracterizadas por su estado de fisuración y por la ley de tensiones existente en la sección más desfavorable (ver figura 10).

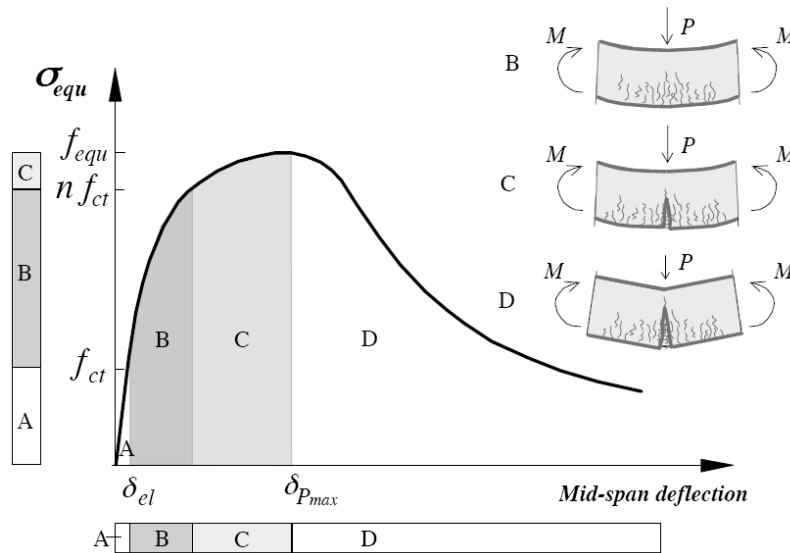


Figura 10. Curva a tensión equivalente-flecha en un ensayo a flexión (Spasojevic, 2006)

La zona “A” está caracterizada por un comportamiento elástico en toda la pieza. El límite de esta región se alcanza cuando en la fibra más traccionada la deformación máxima a tracción alcanza el valor de la deformación elástica.

En esta fase, se alcanza entre un 35-40% de la resistencia total a flexión y, aproximadamente, un 10% de la deformación máxima.

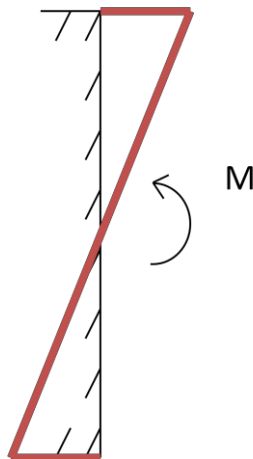


Figura 11. Diagrama tensional en zona A (López Martínez, 2012)

La zona “B” se caracteriza por un comportamiento no lineal con el desarrollo de

un proceso de micro fisuración cuando la deformación en la fibra más solicitada supera el valor elástico de la deformación a tracción. Esto da como resultado una distribución de esfuerzos asimétrica, con un desplazamiento de la fibra neutra respecto al centro de gravedad de la sección hacia la zona de compresión. La zona de endurecimiento a flexión se puede dar incluso en materiales que no poseen un endurecimiento a tracción directa del material. Se distinguirá entonces entre endurecimiento por deformación o endurecimiento por deflexión a flexión del material.

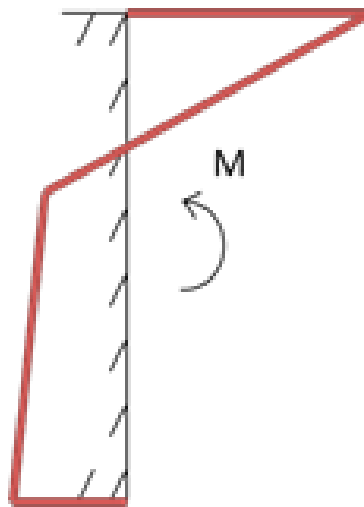
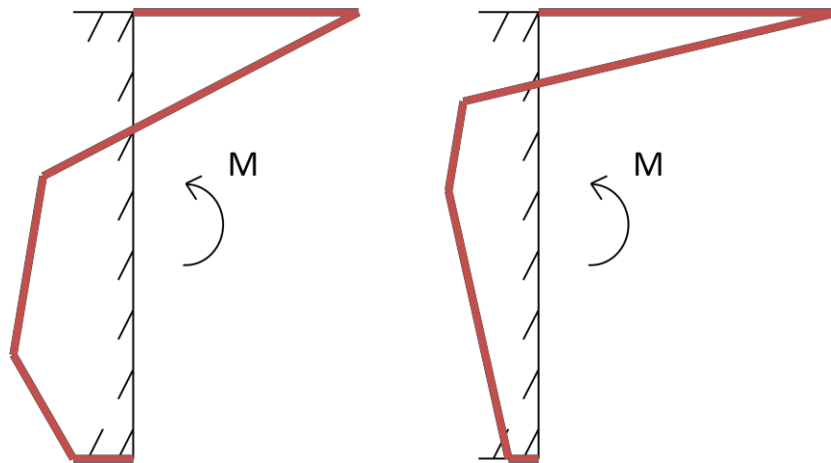


Figura 12. Diagrama tensional en zona B (López Martínez, 2012)

Cuando se alcanza la deformación asociada a la máxima tensión del, comienza a generarse una macro fisura en la sección crítica. Debido a la distribución muy a menudo no uniforme de fibras, la aparición de la macro fisura en la zona más solicitada no siempre tiene lugar.

Esta fase comprende las regiones "C" y "D" El comienzo de la fase "D" tiene lugar cuando se alcanza a flexión la carga que coincide con un estado en que en la sección crítica de rotura, la deformación a tracción máxima es superior a la deformación asociada a la máxima tensión.



**Figura 13** Diagrama tensional en zona C (izquierda) y zona D (derecha) (López Martínez, 2012)

## 2.5 Durabilidad

De la durabilidad del hormigón depende que las armaduras queden protegidas de los agentes externos y que la estructura soporte las acciones físicas y químicas durante la vida útil para la que se proyecta. La durabilidad del HMARRF es muy superior a la de los otros hormigones, y dada la importancia de esta propiedad es una de las que más identifican y ensalzan su utilidad y aplicación. Un dato que recoge la Recomendación Francesa (Interim Recommendations, 2012) es que la permeabilidad al oxígeno para el HMARRF es mil veces inferior que para el HC.

A nivel microscópico está estrechamente relacionada con la porosidad: La elevadísima compacidad y la baja relación a/c hacen que la cantidad total de poros presentes en la microestructura sea realmente baja (del 3 al 5%) y que estos no estén interconectados, lo que origina la estupenda durabilidad del HMARRF. Es gracias a que no existe una red de poros capilares interconectados que la baja alcalinidad del hormigón fresco (debido a las reacciones de hidratación portlandita-humo de sílice) no constituye un problema de corrosión, y que la penetración de gases contaminantes, sales o cloruros y los ciclos de hielo-deshielo no comprometen su resistencia. Por ello, elevadas cantidades de humo de sílice en el HMARRF no son contraproducentes aunque dote al medio de un pH mucho menos básico. La elevada durabilidad, por lo tanto, se traduce en una vida útil más larga del material y de la estructura, acompañada de escasos e incluso nulos requisitos de mantenimiento, y de bajos recubrimientos de la armadura embebida siempre y cuando no se produzcan daños por desprendimiento. Todo esto finalmente desemboca en menores costes económicos (García, 2013).

## 2.6 Otras propiedades.

### **Módulo de Young**

Existen diversas fórmulas que correlacionan las resistencias a compresión de los HMAR con su módulo elástico, obteniéndose resultados suficientemente parecidos a los experimentales. El rango de valores del módulo de elasticidad del UHPRFC está en 40-50 GPa, y se alcanzan los 60 GPa si en la dosificación se ha incluido árido grueso de alta resistencia. Si se necesitase tomar un valor de referencia, en la Recomendación Francesa aconsejan tomar 55 Gpa. (Interim Recommendations, 2012)

### **Retracción.**

La retracción de secado es aquella que se produce durante los 20 días iniciales al disminuir la presión capilar en los poros como consecuencia de la evaporación de parte del agua al medio.

La retracción autógena se produce porque las reacciones de hidratación del binder dan lugar a un volumen de productos inferior al volumen de reactivos. Se conoce también como retracción química o auto desecación, y si no fuera por la presencia de fibras en la dosificación este fenómeno causaría la fisuración a edades tempranas del hormigón.

Según la normativa francesa (Interim Recommendations, 2012), la retracción del HMARRF es principalmente autógena y se consigue eliminar casi por completo con un tratamiento térmico.

Si no se dispone de datos aconseja emplear como valor de referencia una retracción de  $550 \mu\text{m/m}$ . La retracción total o global se completa a los 90 días, pero con un tratamiento térmico se consigue estabilizar en los 2 primeros días. En el Anexo 4 de la Recomendación Francesa (Interim Recommendations, 2012) se concluye que después de un tratamiento térmico el hormigón no sufrirá retracción autógena, y recoge un valor de retracción total de  $550 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$  para una relación  $w/b=0,17-0,2$ . No obstante, la bibliografía general nos habla de retracciones globales a los 90 días que pueden ir desde los  $790 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$  a los  $890 \cdot 10^{-6} \text{ m/m}$ .

### **Densidad**

Los valores de densidad de un UHPCRF superan a los de cualquier otro hormigón (están alrededor de  $2320-2760 \text{ kg/m}^3$ ) debido a su compacta microestructura.

En comparación con el acero, el peso específico del UHPCRF es del orden de un tercio más reducido siendo su resistencia a compresión similar, lo que lo convierte en un material cuyo desarrollo ofrece una aplica gama de nuevas posibilidades.



## Tratamiento térmico

Los tratamientos térmicos aceleran las reacciones de hidratación en los HMARRF y, como consecuencia, mejoraran muchas otras propiedades. Así pues, el humo de sílice se hidrata antes, la adquisición de resistencias es mucho más rápida y la porosidad capilar y la interconexión entre poros se ven reducidas de modo que se obtiene un material más durable. De media, la resistencia alcanzada en los hormigones 14 sometidos a tratamientos térmicos es un 42% superior frente a los que no han Recibido curado.

## Fluencia

El HMARRF tiene un coeficiente de fluencia para tiempo infinito de 0,78, cifra que contrasta con el coeficiente de fluencia de un hormigón convencional que suele tomar valores entre 2- 4. Después del tratamiento térmico el efecto de la fluencia se reduce mucho, hasta 0,2. Teniendo en cuenta que dicho coeficiente varía en función de la edad del hormigón en el momento de aplicación de la carga, en el Anexo 4 de la Recomendación Francesa (Interim Recommendations, 2012) encontramos una tabla con los datos que reproduce a continuación: Edad de aplicación de la carga (días).

**Tabla 2:** Coeficientes de fluencia de un HMARRF. (Interim Recommendations, 2012)

| Edad de aplicación de la carga (días) | Coficiente de fluencia |
|---------------------------------------|------------------------|
| 28                                    | 1,08                   |
| 7                                     | 1,57                   |
| 4                                     | 1,8                    |
| 1                                     | 2,27                   |

Si no se dispone de datos aconseja emplear un valor de 0.8, y si se aplica tratamiento térmico dicho valor se puede reducir a 0.2. (Interim Recommendations, 2012)

## Fatiga

El fallo por ciclos de carga y descarga resulta ser un criterio importante de diseño en las estructuras construidas con HMARRF dada las características estéticas propias de las mismas como puede ser la esbeltez. Sin embargo, las fibras hacen que el análisis de fatiga no resulte determinante y que aunque se produzcan algunas grietas estas no se propaguen.

## **Resistencia al fuego**

Como ya se ha comentado, una manera común de mejorar el comportamiento del HMARRF frente al fuego es empleando un 0,6% en volumen de fibras de polipropileno. Precisamente la reducida porosidad de este hormigón no permite que el vapor de agua circule por su interior por lo que se precisa de las fibras poliméricas para que al derretirse debido a las altas temperaturas formen cavidades que eviten la explosión del hormigón.

## **Estética**

Con este hormigón podemos obtener soluciones de elementos más esbeltos y ligeros, y finalmente estructuras visualmente más agradables que las alejen de los tópicos de estructuras pesadas y robustas que rodean a las construcciones de hormigón convencional.

Esta mejora estética es el resultado, en última instancia, de la elevada resistencia del hormigón a nivel macroestructural y de su baja porosidad y elevada compacidad a nivel microestructural, que permiten reducir las secciones resistentes sin comprometer la durabilidad de los elementos. Además, el tamaño reducido de todos sus componentes a nivel matricial así como su condición de autocompactante hacen que se obtengan muy buenos acabados superficiales con los encofrados adecuados.

## **2.7 Aplicaciones del UHPCFR en la ingeniería.**

Desde que se introdujo en la ingeniería civil hace ya más de dos décadas, la experiencia en el empleo de UHPCFR en múltiples aplicaciones ingenieriles nos muestra las claves que lo hacen realmente competitivo en sus usos prácticos, como son la reducción de peso propio y carga muerta (lo que posibilita por ejemplo la reducción de acciones sísmicas de diseño), la esbeltez alcanzada en las construcciones (pequeño ratio del cociente altura/vano de un puente), la elevada ductilidad y resistencia a flexión, la efectividad de las uniones entre elementos, así como la reducción de gastos en mantenimiento por la mejora de la durabilidad.

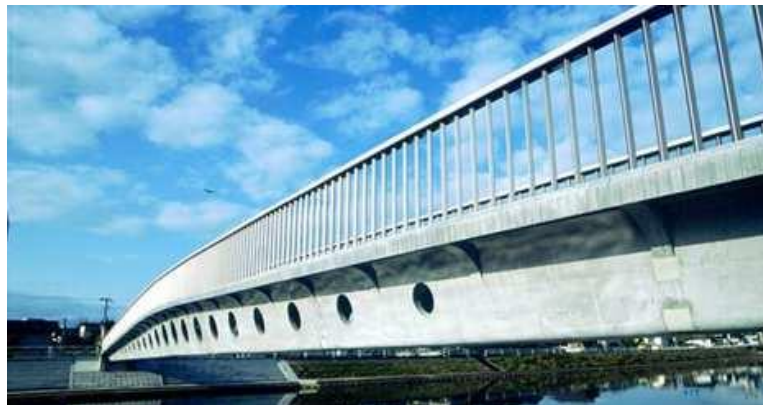
Además, el impulso de este material incita a que se innove en las formas constructivas y en los procesos de fabricación y montaje, avocando a la ingeniería que renueve sus métodos y desarrolle tecnologías más vanguardistas. El UHPC se ha usado alrededor del mundo sobre todo en la construcción de puentes de carretera y pasarelas peatonales, en paneles de protección y aplicaciones arquitectónicas. En países como Canadá o Australia vemos soluciones realizadas con UHPC desde hace más de 10 años.

Tiene una excepcional capacidad de absorber la energía y resistencia a la fragmentación, lo que hace que sea ideal para fabricar paneles y elementos que requieran soportar explosiones, impactos o cargas de choque. Pero debido a sus características y propiedades, las principales aplicaciones reales han sido en la construcción de pasarelas y puentes de carreteras. De hecho, la primera estructura de UHPC del mundo se finalizó en 1997 en Canadá. Se trata de una viga triangulada de 60 m de luz sobre el río Magog, conocida como la Pasarela de Sherbloom (ver figura 14). Las diagonales de dicha viga fueron embebidas en tubos de acero para alcanzar elevadas resistencias a tracción.



**Figura 14 Pasarela de Sherbloom. (García, 2013)**

Cinco años después se inauguraron dos pasarelas, la pasarela Sakata Mirai en Japón, de 50 m de luz, y otra en Corea del sur, la Pasarela de la Paz, de 120 m de luz y sección en pi de 1.3 m de canto.



**Figura 15 Pasarela Sakata Mirai. (García, 2013)**

En 2007 se finalizó en Alemania la pasarela de Kassel. Es un puente híbrido de seis vanos de 36 m cada uno con conexiones atornilladas en la que se combina el uso del HMAR en la losa y cordones superiores con el uso del acero en las diagonales y el cordón inferior. En Francia, en 2009 se terminó el Puente del Diablo, también de HMAR, y un año después en Austria se completó el primer puente de carretera en arco, Wild Bridge. El par de arcos

paralelos de 69 m de luz fueron fabricados con HMAR mientras que el tablero y los soportes son de HA.



**Figura 16** Puente de Gärtnerplatz, en Kassel. (García, 2013)



**Figura 17** Wild Bridge en construcción. (García, 2013)

Por otro lado, su aplicación a la construcción de elementos de poco espesor como cubiertas pone de manifiesto todas las propiedades de este material. Un reconocido ejemplo se halla en una de las estaciones de tren en Canadá (2004). La estación de Shawnessy es una singular estructura de UHPCFR cuyas láminas de cubierta tienen un espesor de tan sólo 20 mm.

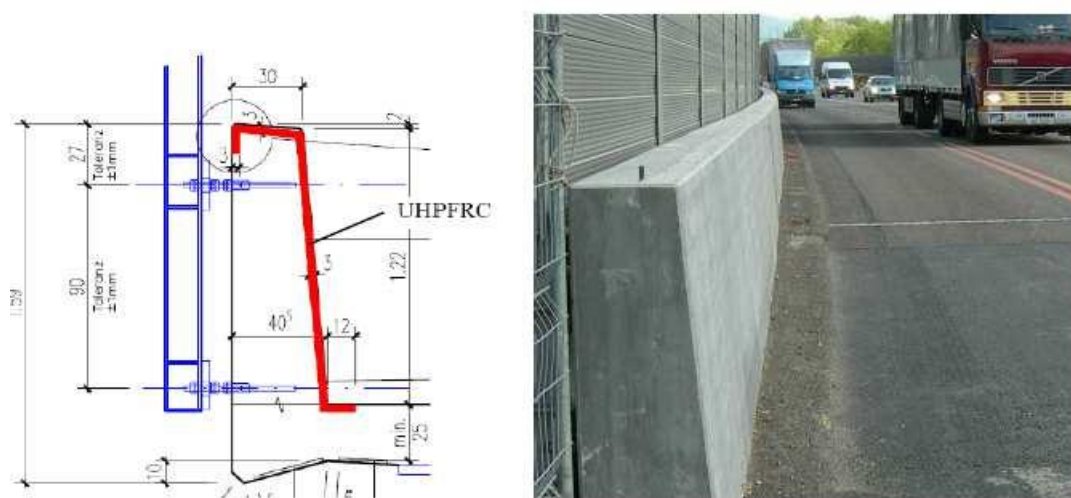


**Figura 18** Detalle de los soportes (izquierda), Modelo a escala de la cubierta de la estación de Shawnessy (derecha). (García, 2013)

Con el HMAR se reduce el peso y el volumen de la pantalla de tablestacas, mejorando los procesos de apilamiento, manipulación e inca con respecto a las de hormigón pretensado convencional.

También se ha empleado el HMARRF como placa de anclaje de diques en sustitución de los sistemas metálicos susceptibles de sufrir corrosión.

Otros usos más o menos generalizados son: la fabricación de tuberías sometidas a elevadas presiones, en pavimentos de hormigón, la rehabilitación y reparación de estructuras de hormigón expuestas a condiciones medioambientales severas, sistemas de protección frente a desgaste y mobiliario.



**Figura 19** Sección típica de una barrera de seguridad tras ser rehabilitada con HMARRF. (García, 2013)

## 2.8 Influencia de las fibras

Según el EHE-08 (Gobierno de España, 2008) las fibras se definen como “son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas”.

De una manera general se pueden clasificar como fibras estructurales, aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa (en el caso de las fibras estructurales, la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón), o como fibras no estructurales, a aquellas que sin considerar en el cálculo esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros.

Por otro lado, de acuerdo con su naturaleza las fibras se clasifican en:

- Fibras de acero
- Fibras poliméricas
- Otras fibras inorgánicas

La efectividad de las fibras puede valorarse por medio de la energía de rotura, expresada en Julios (J), que se evaluará para hormigón moldeado mediante la norma UNE83510.

Las fibras son las responsables en gran medida del comportamiento del hormigón, sobre todo a tracción y en la rama de endurecimiento. Al igual que la cantidad de fibras empleadas, la orientación de las mismas respecto a la carga aplicada es un factor importante a tener en cuenta si queremos que su contribución en las propiedades del hormigón sea más eficiente.

Un modo de controlar la dirección y distribución de las fibras consiste en cuidar el vertido del hormigón en la puesta en obra de manera que las fibras queden paralelas a la dirección del flujo (García, 2013). La propia gravedad también repercute en la orientación de las fibras, pero su efecto puede reducirse mucho si conseguimos mezclas más cohesivas, y es incluso nulo en hormigones híbridos.

No obstante, el factor que más influye en la orientación de las fibras es la proximidad de las mismas a las paredes de los encofrados. Esto se conoce como walleffect y su zona de afección se corresponde con la longitud de las fibras. En los hormigones híbridos también el efecto es mucho más favorable porque las paredes de los encofrados orientan las fibras largas y estas a su vez a las fibras más cortas.

Es evidente que estos efectos se ven acentuados en elementos a hormigonar de mayores espesores, pudiendo introducir variaciones en los diagramas tensión-deformación que se obtienen. Es por ello que la recomendación francesa (Interim Recommendations, 2012) distingue el modo de obtener la curva constitutiva para vigas, placas y láminas gruesas en comparación con placas y láminas delgadas; y propone el factor corrector  $1/K$  que tiene en cuenta el efecto de los métodos de vertido y colocación del hormigón sobre los valores reales de resistencia a tracción.

### 2.8.1 Fibras de vidrio.

#### **Historia y Manufactura.**

Las primeras fibras de vidrio se hicieron fundiendo el extremo de una varilla de vidrio, sujetando la gota a una rueda giratoria y estirando o hilando una fibra. En 1713 Réaumur la tela de vidrio a la Academia de Ciencias de París. EN 1983, En la exposición de Columbia,

Libby produjo fibras de vidrio y los tejidos con seda para producir telas. En 1929, Rosengarth inventó un procedimiento en el que el vidrio fundido fluye hacia el centro de un disco de cerámica con cortes de sierra radiales, que gira a gran velocidad. Por efecto de la fuerza centrífuga las corrientes de vidrio que corren por los dientes de sierra son desprendidas en la orilla a la forma de fibras. Éste se conoce como vidrio centrifugado.

En 1938 se unieron los dos esfuerzos importantes de investigación que se hicieron en Estados Unidos para producir escala industrial productos valiosos de fibra de vidrio, que fueron los de Owens-Illinois y Coming-Glass. Ambos esfuerzos unidos desarrollaron primero los métodos de manufactura para lana de vidrio y luego los de las fibras para textiles. Finalmente esta investigación produjo la Fiberglass (marca registrada) y dio pie a la proliferación de los productos derivados de vidrio fibroso (Morales Ortuño, 2008).

### **Producción de las fibras de vidrio.**

El proceso mediante el cual se producen los filamentos de vidrio es el siguiente.: en un reactor son incorporados todas las materias primas finamente divididas en forma de polvo, donde son fundidas. El vidrio fundido fluye a través de canales que tienen gran cantidad de pequeños hoyos. El vidrio fundido sale desde estos hoyos como un filamento continuó. Estos filamentos continuos pasan sobre un aplicador que les impregna con un cubrimiento químico (o apresto) el cual le dará características especiales para su procesamiento posterior. Este apresto aumenta la habilidad del vidrio para adherirse a otros materiales y es muy importante para determinar la calidad del material. Los filamentos así tratados son curados en estufas para terminar su procesamiento (Morales Ortuño, 2008).

### **Propiedades de la fibra de vidrio.**

Las fibras de vidrio son sin lugar a duda el refuerzo más utilizado en la industria de los plásticos reforzados, de ahí viene el nombre de Plásticos Reforzados en Fibra de Vidrio (FRP). Las principales características que provocan estas preferencias son:

1. Alta resistencia a la tensión
2. Incombustible
3. Biológicamente inerte
4. Excelente resistencia a la intemperie y a gran cantidad de agentes químicos
5. Excelente estabilidad dimensional
6. Baja conductividad térmica

En la siguiente tabla se ve algunas de las propiedades de las fibras de vidrio dependiendo el tipo de fibra.

**Tabla 3** Propiedades de las fibras de vidrio. (Morales Ortuño, 2008)

| Propiedad   | E     | C     | S    | R    |
|---|-------|-------|------|------|
| Gravedad específica                                     | 2,56  | 2,45  | 2,49 | 2,58 |
| Resistencia a la tracción de la fibra GN/m <sup>2</sup> | 3,6   | -     | 4,5  | 4,4  |
| Punto ablandamiento °C                                  | 850   | 690   | -    | 990  |
| Conductividad térmica. W/m°C                            | 1,04  | -     | -    | -    |
| Índice de refracción                                    | 1,545 | 1,549 | -    | -    |
| Módulo de Young GN/m <sup>2</sup>                       | 75,9  | -     | 86,2 | 84,8 |

### Tipos de fibras de vidrio:

Existen diversos tipos de fibra de vidrio y de acuerdo a sus formulaciones podemos mencionar:

**Vidrio a o alcalino:** La fórmula de éstos es la misma que ocupan los envases y vidrios de las ventanas. No tiene gran aceptación en el campo de los FRP. Poseen una buena resistencia eléctrica. Estos tipos de vidrio junto a resinas fenólicas son ampliamente usados como impermeabilizantes.

**Vidrio e:** Empleado en la fabricación de PR, y su aglutinante (apresto) mejora las propiedades fisicoquímicas de unión con el polímero, de tal forma que el compuesto satisface los requerimientos físicos, es decir, son usados donde se requiere una alta resistividad eléctrica, junto con una buena resistencia mecánica.

**Vidrio c:** Vidrio de alta resistencia química, se emplea principalmente en velos sintéticos cuando se requiere fabricar PR que se mantienen en contacto con reactivos químicos muy agresivos.

**Zentron:** Fibra de vidrio que contiene un alto contenido de sílice y una alta resistencia, se usa con resinas epóxicas, éster vinílicas o fenólicas (Arramjos)

### Uso y empleo.

Según el EHE-08 (Gobierno de España, 2008) “Este tipo de fibras podrán emplearse siempre que se garantice un comportamiento adecuado durante la vida útil del elemento estructural, en relación con los problemas potenciales de deterioro de este tipo de fibras como consecuencia de la alcalinidad del medio”.



Dado que los HRF pueden experimentar importantes reducciones de resistencia y tenacidad debido a la exposición al medio ambiente, se deberán tomar las medidas adecuadas tanto sobre la fibra como sobre la matriz cementícea para su protección. En este sentido, las fibras pueden presentarse con una capa protectora superficial de un material epoxídico que reduce la afinidad de las mismas con el hidróxido de calcio, proceso responsable de la fragilización del compuesto.

Condiciones favorables al uso de los materiales de fibra de vidrio:

- En donde requiera un material de alto grado de absorción, inerte, incombustible y acústico para servir de respaldo a un material perforado o decorativo en tratamiento acústico.
- En donde se requiera un material para aislamiento térmico que sea inerte, incombustible y permanente que no sea afectado por hongos, putrefacción, insectos y roedores.

Deben usarse losetas de lana de vidrio en donde se requiera un cielo incombustible, ligero y acústico.

Condiciones desfavorables al uso de los materiales de fibra de vidrio:

- En donde puedan encontrarse temperaturas mayores de 500 °F.

Las piezas de fibras de vidrio, con los años sufren modificaciones y deformaciones en su estructura y forma, además de que se vuelven quebradizas, en especial las que se encuentran bajo los rayos del sol o expuesta a calor y frío extremo.

La exposición a altos niveles de fibra de vidrio en el aire puede agravar el asma o la bronquitis.

### 2.8.2 Las fibras de vidrio para morteros.

Hormigón reforzado con fibras de vidrio (GRFC) se ideó por primera vez en Rusia, en la década de los 40, en un intento por reducir el grosor de las piezas de hormigón y hacerlas aptas para los cerramientos de fachada. Pero ello se sustituyó el refuerzo de acero por hebras de fibra de vidrio, que no requieran de dicha protección obteniendo así paneles más finos (otra teoría no documentada, sugiere no obstante que el empleo de fibras de vidrio surgió en un intento de ahorrar acero para la industria bélica durante la segunda guerra mundial). A partir de las décadas de los 60, se empezó a utilizar fibras de vidrio en sustitución del asbesto, por el potencial cancerígeno de este último. La fibra de vidrio es un material consistente en fibras continuas o discontinuas de vidrio. (Mármol Salazar, 2010)

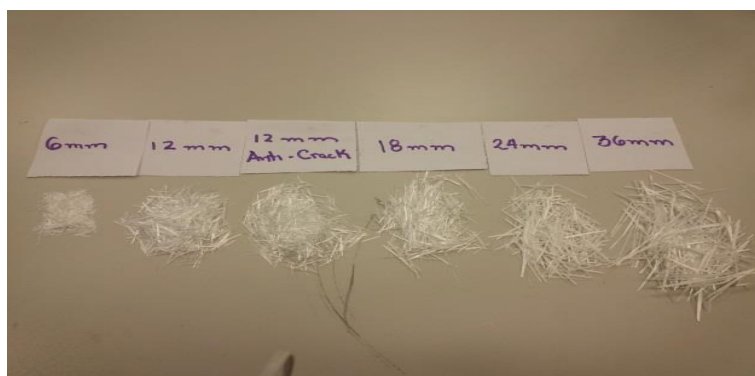


Figura 20 Diferentes tipos de fibras de vidrio.

El GFRC es un 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. Debido a que normalmente las piezas de GRC es la creación de paneles de cara vista, en el mortero se suele utilizar hormigón blanco, y arena de granulometrías finas; razón por la cual también se le denomina micro-hormigón. Además se suelen utilizar distintos adictivos en la mezcla para facilitar el encofrado del molde o para controlar mejor la evaporación de agua y evitar así la fisuración de las piezas. También admite el empleo de colorantes en la mezcla. Se ha descubierto que la fibra de vidrio reacciona con los álcalis del hormigón, por lo que se requiere un cemento con bajo porcentaje de álcalis, y se emplea un tipo de fibras resistente a los álcalis. Son empleados principalmente en paneles de fachada para edificaciones, tuberías, depósitos líquidos, separaciones como paredes y puertas, elementos resistentes al fuego, tejas, mobiliarios urbanos, pavimentos, encofrados, reparaciones arquitectónicas, generalmente prefabricados. Su mezclado es diferente al de las fibras de acero, por ejemplo cuando se trata de capas delgadas, las fibras en madejas se alimentan dentro de una pistola de aire comprimido que las corta y las rocía con la lechada de cemento. Es lo que se denomina colocación por proyección (Mármol Salazar, 2010).

### Características mecánicas del GFRC.

Las características mecánicas del GFRC deben estar comprendidas entre los siguientes valores (valores usuales de las propiedades principales del GFRC a 28 días de edad):

Tabla 4 Propiedades del GRFC. (Mármol Salazar, 2010)

| Propiedades                 | Unidades | Valores |
|-----------------------------|----------|---------|
| Resistencia a la compresión | M        | 50-80   |
| Módulo de elasticidad       | G        | 10-20   |
| Límite de proporcionalidad  | M        | 7-11    |
| Módulo de rotura            | M        | 15-25   |

## Aplicaciones del hormigón con fibras de vidrio.

Edificios Modulares, - Una o dos plantas, se han construido con fibra de vidrio reforzada de AR paneles sándwich de cemento integrados en un marco de acero estructural ligero durante la erección. Construcción Sándwich del panel implica dos de 8 mm de espesor reforzado con fibra AR pieles de hormigón unidos a ambos lados de un 155 mm de espesor del núcleo de hormigón ligero. Este sistema de construcción ha sido probado de forma independiente para la capacidad de carga, aislamiento acústico, conductividad térmica, y resistencia al fuego. Mucho antes, en la década de 1970, se utilizaron paneles GFRC en la pared exterior de las casas de entramado de madera prefabricadas construidos para satisfacer la escasez de viviendas en Escocia. Los paneles fueron típicamente de 10 mm de espesor y tenía un acabado en la superficie total. Arandelas de fundición en simples para la cara de fijación de los paneles se incorporaron a 50 mm del centro. Estas casas fueron inspeccionados de forma independiente por la (Asociación de Concreto reforzado con vidrio, Reino Unido) GRC después de 20 años y se encontró que están en buenas condiciones de uso. Véase figura 21.



**Figura 21** GFRC Insulated Wall Panels for Modular Housing in Dubai (Mármol Salazar, 2010)

GFRC paneles de fachada arquitectónico - pueden fabricarse como paredes y ventanas, unidades de antepecho, paneles de soffito y fascia, elementos de techo abuhardillado, así como montantes, cornisas y columna cubiertas. La figura 7 muestra una fotografía del Centro de Convenciones de Cervantes situado en St. Louis en el que 1.670 metros cuadrados del edificio exterior se cubrió de GFRC paneles de fachada arquitectónica. El tamaño del panel varía pero el promedio fue de aprox. 2,4 m x 6,0 m. La piel de panel consistió de 12,5 mm de espesor, además de GFRC una mezcla de revestimiento de espesor de 6 mm en una estructura de acero estructural, que a su vez se une al edificio. En varios paneles, dos acabados se combinaron en el mismo panel. De ladrillo acabado rojo en los paneles se consigue con el uso de cementos blancos, arenas y pigmentos. Los detalles arquitectónicos intrincados en estos paneles fueron creados mediante la

formación de los paneles más de moldes de revestimiento de goma. Algunos paneles también tenían acabado de piedra caliza. Esto se logró con el uso cascajo, pigmento y arenado. Véase figura 22.



**Figura 22** GFR panels on the Cervantes Convention Centre, StLouis. 2 finishes Ornate/pigmented and stone simulation (Mármol Salazar, 2010)

GFR Elements Decorativos --Hay capaz de imitar de cerca los materiales naturales, que tienden a ser caros y escasos. Formas complejas delgadas con excelentes acabado de superficie y de la superficie detalles se pueden formar fácilmente usando materiales de cemento reforzados con fibra de vidrio AR. Moldes para formar estas formas se toman con frecuencia de tallas originales deterioradas. Elementos arquitectónicos de GFR son relativamente ligeros de peso y requieren poco mantenimiento. Estos atributos hacen del GFR elementos arquitectónicos una buena opción tanto para los edificios nuevos y renovados. Véase figura 23.



**Figura 23** Nile City project, Egypt. 2 x twin Towers (Mármol Salazar, 2010)

Carretera y ferrocarril. En todo el mundo, las nuevas carreteras y sistemas ferroviarios de transporte masivo compiten por el espacio en las zonas urbanas ya desarrolladas. El resultado es que las principales rutas de tráfico se encuentran más cerca de las zonas comerciales y residenciales y se hace necesario para suprimir la contaminación acústica al entorno. Barreras acústicas de GFR se están utilizando cada vez más, ya que son

de peso ligero y ofrecen simplicidad y rapidez de montaje sin requerir el uso de maquinaria de elevación pesada. Esto le da a la interrupción menor al tráfico y reduce considerablemente las cargas en las estructuras elevadas que permiten el mismo material que se utilizará en todas partes. La capacidad de moldeo de del GFRC permite diseños estéticamente agradables que son más atractivos y aceptables para los residentes y los viajeros, así como a los ingenieros de puentes y arquitectos por igual. Además, del GFRC tiene una excelente resistencia al ataque de sal, hielo- deshielo y podridos por lo tanto reduce el mantenimiento. Véase figura 24.



**Figura 24** *Bridge Parapets, Thailand* (Mármol Salazar, 2010)

### 2.8.3 UHPC con fibras de vidrio.

Ultra High Performance Concrete (UHPC) se utiliza para diseñar elementos estructurales con combinaciones únicas de estética, ligereza, propiedades de ductilidad y de auto-colocación. La dificultad de diseñar un compuesto dúctil es la obtención de un compromiso óptimo entre los refuerzos, los puntos fuertes de la matriz de cemento, reología y costos.

Se presentara un estudio en el cual se combina el UHPC con las fibras de vidrio como refuerzo.

Un Ultra High Performance Concrete Reinforced with Glass Fibers (GF-UHPRC) se describe para geometrías de placas delgadas. Incluyendo caracterización mecánica completa, basado en pruebas de flexión de cuatro puntos, y revertir analiza para extraer el comportamiento post-fisuración en tracción (por ejemplo, la resistencia a la tracción en comparación con la cepa relación de las fibras de vidrio). Los resultados de las pruebas de envejecimiento acelerado en agua a 50°C mostraron que se mantuvieron su durabilidad y ductilidad (Parra-Montesinos, 2012).

El propósito de este trabajo es presentar un hormigón de ultra alto rendimiento reforzado con fibras de vidrio (llamados aquí GF-UHPRC) para aplicaciones de placas delgadas. Las prestaciones mecánicas de este material fueron evaluados en las pruebas de flexión. Se utilizó un método de análisis inverso, basado en el equilibrio mecánico de la sección transversal agrietada para obtener el comportamiento a la tracción directa. Un punto importante en todos los compuestos de cemento reforzado con fibra de vidrio es una pérdida de ductilidad debido al envejecimiento húmedo. Este fenómeno se atribuye al crecimiento de portlandita en la interfase vidrio / fibra de mortero. Los resultados mostraron que la ductilidad fue mantenida después de ensayos de envejecimiento acelerado.

Desde un punto de vista reológico, el objetivo es diseñar un GF-UHPRC con capacidad de auto colocación. Se necesita una elección apropiada de dimensionamiento para asegurar una buena fluidez y una unión adecuada entre la fibra y la matriz. Los resultados mecánicas que se muestran en este documento se basan en fibras hidrófilas disponibles en el mercado. Las características físicas de las fibras de vidrio se muestran a continuación.

- Módulo de Young: 72 GPa

- Resistencia a la tracción: 1200 MPa-1700 MPa

- Longitud: 6 mm
- Diámetro: 0.15 mm-0.2 mm
- Esbeltez: 30-40
- Densidad: 2.6 g / cm<sup>3</sup>

Otros dos aspectos deben ser tomados en cuenta para el diseño de un GF-UHPRC dúctil. La resistencia de la matriz de cemento debe adaptarse a la resistencia a la tracción y el aspecto relación de las fibras de vidrio para evitar un fallo prematuro del material compuesto. Los compuestos en este estudio tienen una relación W / C 0,25 hasta 0,30, una resistencia a la compresión de 120-140MPa después de la hidratación de 28 días a temperatura ambiente, y hasta 170 MPa después de un tratamiento acelerando de envejecimiento a 50 ° C. El contenido en volumen de fibras de vidrio debe garantizar una separación media adecuada de las fibras compatibles con el tamaño máximo de la arena de la matriz para asegurar buenas propiedades reológicas y eficiente de puenteo de grietas. Por otra parte, cada fibra debe tener suficiente movilidad, sin formar agrupaciones. El contenido en volumen de fibras de vidrio en GF-UHPRC está por lo tanto limitada a 2% -2,5% para asegurar un compuesto de auto-colocación (Fig. 25).



**Figura 25.** Vertido de la pasta (Parra-Montesinos, 2012)

### **Las pruebas de caracterización.**

El comportamiento a la tracción se caracterizó por un análisis inverso llevado a cabo pruebas de flexión en cuatro puntos. Los especímenes fueron 450 x 145 x 20 mm<sup>3</sup> placas cortadas a partir de una placa más grande después del desmolde a las 24 horas. Las muestras fueron almacenadas en una habitación a 20 ° C y 100% HR durante 28 días. Un dispositivo fijado a la placa mide la verdadera deflexión (Fig. 26). Este último se controló durante la prueba por un sensor LVDT a una velocidad de 0,1 mm / min.



**Figura 26** *Dispositivo de medición de las deformaciones.* (Parra-Montesinos, 2012)

Se estableció la ubicación de la grieta principal después del pico; la abertura mecanismo dependía directamente en el anclaje de las fibras en la matriz y lo bien que las fibras se encuentran en relación con la grieta principal. Es importante destacar que la deflexión final obtenido antes del fallo de las fibras no es un material sino una propiedad estructural. Tan pronto como se estableció una distribución uniforme de la grieta en la zona central de la muestra, se alcanzó el final de deflexión. En consecuencia una placa más larga aumentaría directamente esta deflexión y el agrietamiento múltiple.

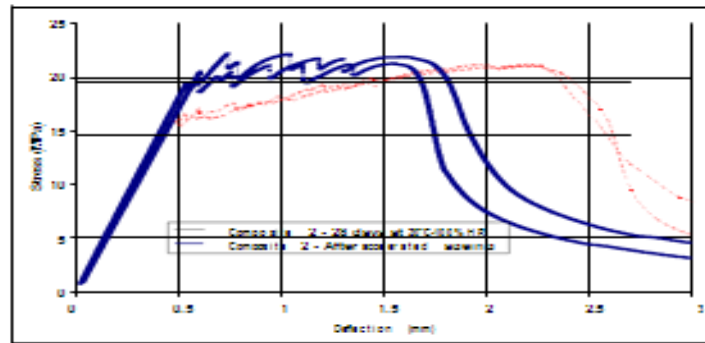
### **Durabilidad.**

Un método de envejecimiento acelerado se utilizó para evaluar el desempeño a largo plazo de GF-UHPRC, utilizando la inmersión común en el método de agua caliente para diversos períodos. Las siguientes pruebas se llevaron a cabo. Las muestras se almacenaron en una cámara húmeda a 20 ° C-100% HR durante un mes, luego se colocan en agua caliente a 50 ° C durante tres meses después del desmolde a las 24h.

La figura 27 ilustra el mantenimiento de la ductilidad de este material compuesto después de envejecimiento en húmedo. Esta resistencia al envejecimiento se debe a la utilización óptima de una carga puzolánica en la matriz, lo que limita la formación de portlandita en la interfase de fibra. Agrietamiento múltiple fue observada y la fuerza máxima flexión se alcanzó para una deflexión de ~ 1.5 mm. De acuerdo con observaciones anteriores sobre la ductilidad estructural, este impacto sobre la deflexión final no debe ser considerado como una propiedad del material. De hecho, la ductilidad estructural se rige en gran medida por la longitud de la muestra. El límite de proporcionalidad aumentó y fue igual a 20 MPa; el módulo de elasticidad se mantuvo sin cambios. Esto se debió al cemento de hidratación y reacciones puzolánicas, los cuales aumentaron durante el envejecimiento acelerado. La resistencia a la



compresión del material compuesto con 2,5% de fibras fue de 170 MPa después del tratamiento de envejecimiento.



**Figura 27** Resultados de ensayo de flexión de cuatro puntos después de envejecimiento acelerado, compuesto 2.

## Conclusiones.

Un hormigón, autocompactante, dúctil y de ultra alto rendimiento fue diseñado conteniendo fibras de vidrio. La ductilidad se mantuvo en los elementos estructurales finos después de ensayos de envejecimiento acelerado por una combinación óptima de tipos de fibras y composiciones de matriz. Se propuso el análisis inverso de los resultados de flexión para extraer el comportamiento mecánico del material compuesto en tensión directa después de tomar en cuenta el efecto de escala. La curvatura se utilizó como un parámetro de la descripción; el concepto de craqueo, por tanto, no es explícito. De acuerdo con el modelo presentado, la tracción comportamiento es única y podría ser utilizado en los códigos para diseñar elementos estructurales delgados. Teniendo en cuenta el elevado rendimiento mecánico de esta nueva GF-UHPRC, en términos de resistencia, ductilidad y durabilidad, creemos firmemente que los elementos estructurales innovadoras se pueden desarrollar con estos compuestos, facilitando de este modo la unidad actual en industrias de la construcción desde hace más sostenible y prácticas de eficiencia energética (Parra-Montesinos, 2012).

## Capitulo III. Programa Experimental y Metodología.

---

## 3.1 Programa Experimental.

---

Se parte de una dosificación de Ultra High Performance Concrete (UHPC) en la cual se analizarán los efectos que causa la incorporación de las fibras.

Las fibras que se incorporarán son:

- Fibras de acero (como referencias)
- Fibras de vidrio (Objetivo).
- Fibras Sintéticas (Macro y micro).

Ya mencionado antes en los objetivos del estudio, es conocer los efectos de las fibras de vidrio en el UHPC, para esto se analizarán los comportamientos en estado fresco y endurecido. Para lo cual se consideraron las siguientes variables:

- Tipo de fibra.

Los tres tipos de fibras que se utilizarán se muestran en la tabla 4 la cual contiene los tipos fibras y cada uno tiene una gama diferente de fibras.

*Tabla 5 Tipos de fibras.*

| <b>Vidrio</b> | <b>Acero</b> | <b>Sintéticas</b> |
|---------------|--------------|-------------------|
| 6 mm          | 13 mm        | 45 mm             |
| 12 mm         |              | 0,2 mm            |
| 12 mm AC      |              |                   |
| 18 mm         |              |                   |
| 24 mm         |              |                   |
| 36 mm         |              |                   |

- Contenido de fibra.

Se utilizaron diferentes tipos de contenidos con el fin que la mezcla trabajara como un hormigón autocompactable. En la tabla 5 se muestran los contenidos utilizados según el tipo de fibra.

**Tabla 6** Contenido de fibras según el tipo de fibra.

| <b>Tipo de fibra</b> | <b>Contenido (%)</b> |
|----------------------|----------------------|
| Vidrio               | 1 - 2                |
| Acero                | 1 - 2                |
| Macro Sintética      | 2                    |
| Micro Sintética      | 0,5                  |

Según los estudios previos y las investigaciones hechas en relación a la dosificación de las fibras en los hormigones se ha determinado el uso de dos contenidos de 1% y 2% por volumen de la mezcla.

Este contenido no se utilizó en todas las muestras ya que las fibras tienen diferentes propiedades lo cual hace que se variara el contenido para conseguir mantener la consistencia deseada.

- Condiciones de curado.

Estas probetas se sometieron a dos tipos de curados y se analizaron curados a largo y corto plazo. Las condiciones de curado que se utilizaron fueron:

- ✓ Curado en cámara húmeda 90 días.
- ✓ Curado en cámara húmeda 28 días

Aparte de estos curados se le realizó un tratamiento de envejecimiento acelerado para obtener resistencia en menor tiempo, este ensayo se realizó siguiendo las normas UNE-EN 14649( ( UNE-EN14649, 2005) la cual nos indica cómo realizar este tratamiento acelerado.

- Tiempo de mezclado de la mezcla.

Para este estudio se consideraron dos tiempos de fraguado. Se utilizaron de 5 min y 10 min con lo cual se buscaba como objetivo el tiempo en el cual la mezcla tuviera un comportamiento homogéneo y con la consistencia deseada para que la mezcla se considerara autocompactable.

### 3.1.1 Propiedades Analizadas.

Se analizaron varias propiedades para poder caracterizar los efectos producidos por las fibras en el UHPC. Las propiedades analizadas fueron:

- **Efecto sobre la consistencia.** Se realizó ensayo con el cono de Abrams.
- **Efecto sobre la resistencia (Flexo tracción).** Se ensayaron las muestras a flexo traccion con el ensayo a 4 puntos.
- **Comportamiento a rotura.** Se determinó el comportamiento a la rotura estudiado las gráficas de los ensayos de flexo traccion y se realizaron fotografías con un microscopio para ver la adherencia matriz fibra. También se hicieron videos y fotografía en los ensayos a 4 puntos para ver el comportamiento de las muestras mientras estas eran cargadas.

El estudio experimental se resumirá en la tabla programa la cual contiene sistemáticamente y de manera ordenada los ensayos, variables, propiedades analizadas y las muestra realizadas a lo largo del estudio

**Tabla 7** Tabla Programa.

| <b>VARIABLES CONSIDERADAS</b>  |   |         |                  |                  |
|--------------------------------|---|---------|------------------|------------------|
| TIPO DE FIBRAS                 | VIDRIO  | ACERO   | MACRO SINTÉTICAS | MICRO SINTÉTICAS |
| TAMAÑO DE LAS FIBRAS (MM).     | 6, 12, 12 AC, 18, 24 Y 36.                          | 13      | 45               | 0,2              |
| CONTENIDO DE FIBRAS. (%)       | 1<br>2  | 1<br>2  | 2                | 0,5              |
| CONDICIONES DE CURADO.         | 28 DÍAS<br>90 DÍAS<br>TRATAMIENTO ACELERADO.        | 28 DÍAS | 28 DÍAS          | 28 DÍAS.         |
| <b>PROPIEDADES ANALIZADAS.</b> |   |         |                  |                  |
| TIEMPO DE LA MEZCLA            | 5 MINUTOS<br>10 MINUTOS.                            |         |                  |                  |
| CONSISTENCIA                   | CONO DE ABRAMS                                      |         |                  |                  |
| RESISTENCIA                    | ENSAYO DE FLEXO TRACCION. MÉTODO DE LOS 4 PUNTOS.   |         |                  |                  |
| COMPORTAMIENTO A LA ROTURA.    | FOTOGRAFÍAS CON UN MICROSCOPIO.                     | N/C     | N/C              | N/C              |
| ESPÉCIMEN REALIZADOS           | SE REALIZARON DOS ESPÉCIMEN POR CADA TIPO DE FIBRA. |         |                  |                  |

Nota: Se realizaron los ensayos del cono de Abrams y los ensayos a flexo traccion a todos los especímenes a todas las edades y considerando todos los tiempos de mezclado.

### 3.2 Materiales.

Para llevar a cabo este trabajo se utilizaron únicamente materiales de origen Español. Para la producción de la pasta se utilizó una única dosificación.

Esta dosificación es la utilizada por el grupo del Dr. Pedro Serna Ros en la UPV, se ha elaborado un estudio amplio de más de 110 dosificaciones, dentro del programa de la Tesis Doctoral llevado a cabo por Esteban Camacho (Camacho Torregrosa, 2013), a partir de las dosificaciones empleadas por diferentes autores y que han sido publicadas en congresos y revistas internacionales.

La dosificación utilizada para la creación de las probetas fue la siguiente. Véase tabla 8.

**Tabla 8** Dosificación del HMAR con fibras.

| <b>Materiales</b>       | <b>Dosificación</b> |
|-------------------------|---------------------|
| CEM 42,5 R/GR           | 750 kg              |
| Humo de sílice 940-U    | 175 kg              |
| Harina de cuarzo U-S500 | 225 kg              |
| Árido grueso 0,8        | 595kg               |
| Árido fino 0,4          | 320 kg              |
| Agua                    | 180 kg              |
| Adictivo Sika 225       | 10 kg               |
| Fibras de vidrio        | 50 kg               |

En los siguientes puntos se describen los materiales utilizados.

### 3.2.1. Cemento

El cemento utilizado para la dosificación fue un cemento de 42.5 de resistencia. Denominación del producto: Cemento Uso del preparado: Conglomerante hidráulico. Uso en hormigones, morteros y pastas (Cemento Esfera, 2014).



**Figura 28** Aspecto de Cemento Esfera.

### 3.2.2 Humo de sílice.

El humo de sílice utilizado fue el Elkem Microsilica® es un ingrediente clave en hormigones avanzados de bajo y ultra - bajo y sin cemento. Es altamente reactivo durante la sinterización, que conduce a una unión mejorada de cerámica a

temperaturas de cocción reducido. Elkem Microsilica® también se utiliza en morteros, mezclas haciendo fuego y otros materiales no conformados. Elkem Microsilica® es un dióxido de silicio amorfo (sílice) que consta de sub- micras partículas y aglomerados de estos primarias esféricas. El material es altamente reactivo en los sistemas de bonos de cemento y cerámica. El diámetro medio de una esfera micro sílice es de aproximadamente 0,15 micras. Aunque algunas de las esferas existen como entidades individuales, la mayoría de ellos forman aglomerados primarios. El tamaño de estas puede variar entre 0,1 y 1 micra. Esta bastante amplia distribución de tamaños de partículas contribuye a la alta eficiencia de embalaje.



**Figura 29** *Aspecto del Humo de Sílice.*

### 3.2.3 Harina de cuarzo.

Se utilizó la harina de cuarzo U-S500 un producto fabricado por la compañía SIKA España/ S.U.A.



**Figura 30** *Harina de cuarzo SIBELCO Hispania.*

### 3.2.4 Árido grueso

El árido grueso utilizado fue árido de sílice con un árido máximo de partícula de 0.8 milímetro.



Figura 31 *Árido grueso.*

### 3.2.5 Árido fino

El árido fino utilizado fue árido de sílice con un árido máximo de partícula de 0.4 milímetro.



Figura 32 *Árido fino.*

### 3.2.6 Agua

Para la preparación de los morteros se utilizó el agua potable procedente de la red de distribución de la universidad politécnica de valencia.

### 3.2.7 Aditivo.

El aditivo utilizado fue un superplastificante con el cual se conseguía la trabajabilidad de la mezcla. El superplastificante fue el Sika 225 Aditivo listo para su empleo en todo tipo de morteros. Está exento de cloruros. (Sika)



Figura 33 *Aditivo Sika 225.*



### 3.2.8 Fibras de vidrio.

Las fibras utilizadas para este proyecto fueron de diversos tipos y formas. Se utilizaron 8 tipos de fibras diferentes.

**Tabla 9** Tipos de fibras de vidrio.

| <b>Tipos de fibras de vidrio.</b> |
|-----------------------------------|
| CEMFIL 60.3 135tex 18mm           |
| CEMFIL 60.3 82tex 12mm            |
| CEMFIL 62.4 82 tex 6mm            |
| CEMFIL Anticrack HP 58/12 S66x6Kg |
| CEMFIL HP 55/24                   |
| CEMFIL HP 67/36 S48x5Kg           |

**CEMFIL Anti-crak HP 58/12:** Anti-Crak® HP (High Performance - Alto Rendimiento) 58/12 es una fibra de vidrio realizada con filamentos de vidrio AR (Álcali Resistente), concebida para reforzar morteros y hormigones contra fisuraciones. Anti-Crak® HP 58/12 posee una excelente cohesión con las matrices hidráulicas y aumenta su resistencia a la tracción antes de la fisuración.

Anti-Crak® HP 58/12 se adapta a todos los tipos de formulación del hormigón y de modos de mezcla gracias a su ensimaje específico, que permite una excelente dispersión de las fibras, una aplicación fácil y una excelente calidad del acabado.

Anti-Crak® HP 58/12 se ha desarrollado para mejorar la resistencia a la fisuración de morteros y hormigones. Se utiliza principalmente para reforzar acabados de suelos y suelos de hormigón residenciales, comerciales e industriales (OCV Reinforcements, 2012).

**CEMFIL HP 67/36:** Anti-Crak® HP 67/36 es una macro fibra de vidrio de “alto rendimiento” resistente a los álcalis y diseñada para refuerzo frente a la fisuración por retracción plástica, térmica y de secado. Anti-Crak® HP 67/36 aumenta la ductilidad y la resistencia a la flexión, y aporta al hormigón solidez, así como resistencia frente a los impactos y la fatiga. Anti-Crak® HP 67/36 se puede usar como refuerzo secundario y, en aplicaciones específicas, también como refuerzo principal. Anti-Crak® HP 67/36 se dispersa de manera rápida y uniforme en toda la matriz de hormigón porque su peso específico es similar al de los agregados usados en el hormigón. Esta característica, inherente al vidrio, garantiza una fibra de alto rendimiento en toda la masa del hormigón. HP 67/36 se ha diseñado especialmente para sustituir el refuerzo primario y secundario (refuerzo de mallazo fino de acero, barra de refuerzo ligera,

fibras sintéticas y de acero) en suelos de hormigón para uso residencial, comercial e industrial, capas de compresión, pavimentos y hormigón prefabricado (OCV Reinforcements, 2012).

**CEMFIL 62:** Cem-FIL® 62 es un hilo cortado de vidrio AR de alta integridad diseñado para utilizarse en sistemas de mezclas secas u otros procesos de pre mezcla para su moldeado posterior en un componente de GRC. Los hilos cortados Cem-FIL® 62 tienen un ensimaje optimizado para la resistencia a la abrasión y la integridad de las fibras al mezclarse con materiales secos. La fibra, baja en tex, permite un refuerzo eficiente con dosis bajas. Es particularmente adecuado para la preparación de mezclas pre embolsadas de morteros de reparación y morteros de recubrimiento de suelos. También se puede usar en la fabricación de componentes GRC estándares - por medio del proceso de colado-vibrado (OCV Reinforcements, 2012).

**CEMFIL 60:** Cem-FIL® 60 es un hilo cortado de vidrio AR de alta integridad diseñado para el premezclado con otros materiales. La mezcla resultante forma elementos de GRC moldeados mediante el colado-vibrado u otros procesos. También se puede usar como componente de morteros de reparación para mejorar su rendimiento.

La elevada integridad de este producto le hace adecuado para su uso en una gran variedad de procesos de producción incluyendo colado-vibrado, bombeo, proyección o mezclado en seco con otros materiales. Los hilos cortados Cem-FIL 60 están diseñados para incorporarse fácilmente incluso con dosificaciones altas; permaneciendo íntegros durante el amasado. Se utiliza en la fabricación de morteros de reparación. Fabricación de componentes de GRC estándares como canales de drenaje o armarios indicadores de consumo, o en aplicaciones arquitectónicas como paneles decorativos y piezas moldeadas y ornamentales (OCV Reinforcements, 2012).

El comportamiento hidrofóbico de Cem-FIL 60 hace la mezcla más fluida, lo cual asegura una mejor compactación y una liberación más fácil de aire atrapado.



**Figura 34** Fibras de vidrio de 6mm.



**Figura 35** *Fibras de Vidrio de 24 mm.*

**Tabla 10** Características y propiedades de las fibras.

| <b>Fibras</b>                                 | <b>CEMFIL Anti-crak HP<br/>67/36</b> | <b>CEMFIL 62</b>                | <b>CEMFIL 60</b>                | <b>CEMFIL Anti-crak HP<br/>58/12</b> |
|---|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Resistencia a la tracción.<br/>(Mpa)</b>   | 1,700                                | 1,700                           | 1,700                           | 1,700                                |
| <b>Resistencia química</b>                    | Muy alta                             | Muy alta                        | Muy alta                        | Muy alta                             |
| <b>Conductividad eléctrica</b>                | muy baja                             | muy baja                        | muy baja                        | muy baja                             |
| <b>Punto de ablandamiento<br/>(°C)</b>        | 860                                  | 860                             | 860                             | 860                                  |
| <b>Material</b>                               | Vidrio resistente a los álcalis      | Vidrio resistente a los álcalis | Vidrio resistente a los álcalis | Vidrio resistente a los álcalis      |
| <b>Humedad (% ISO 3344)</b>                   | 0,3                                  | 0,3                             | 0,3                             | 0,3                                  |
| <b>Contenido de ensimaje (%<br/>ISO 1887)</b> | 0,8                                  | 0,8                             | 0,8                             | 0,8                                  |
| <b>Módulo de elasticidad<br/>(Gpa)</b>        | 72                                   | 72                              | 72                              | 72                                   |
| <b>Densidad (g/cm3)</b>                       | 2,68                                 | 2,68                            | 2,68                            | 2,68                                 |
| <b>Relación de aspecto</b>                    | 67                                   | 45                              | 82                              | 58                                   |
| <b>Longitud (mm)</b>                          | <b>36</b>                            | <b>6, 12, 18</b>                | <b>6, 12, 18 y 24</b>           | <b>12</b>                            |

### 3.2.9 Fibras de acero.

Se utilizaron fibras de acero de una longitud 13 mm y 0,2 de diámetro. En la figura 36 se muestra las fibras utilizadas.



Figura 36 Fibras de Acero.

### 3.2.10 Fibras Sintéticas.

Se utilizaron fibras de sintéticas de dos tipos, Macro sintéticas con una longitud de fibra de 45 mm y Micro sintéticas con un tamaño de fibra de 0,2 mm.



Figura 37 Fibras Macro sintéticas.



Figura 38 Fibras Micro sintéticas.

## 3.3 Metodología de ensayos.

---

En este apartado se detallaran la metodología y los equipos utilizados para la ejecución de los ensayos y experimentos.

### 3.3.1 Proceso de amasado.

La pasta se preparaba en la amasadora para luego colocarla en los moldes. La amasadora utilizada tenía las siguientes características:

- a) Un recipiente de acero inoxidable de una cantidad aproximada de 5 l, con forma y dimensiones como se muestra en la Figura B. Equipado de manera que puede ser fijado firmemente al bastidor de la amasadora durante el amasado y que la altura del recipiente con relación a la pala y, por consiguiente, la separación entre la pala y recipiente, puede ser ajustada y mantenida con precisión.
- b) Una pala de acero inoxidable, de la forma de la representada en la Figura C, accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas (Tabla 11 ), con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente.



Figura 39 Amasadora

Tabla 11 Características mecánica de la amasadora.

| Velocidad | Rotación (min <sup>-1</sup> ) | Movimiento planetario (min <sup>-1</sup> ) |
|-----------|-------------------------------|--|
| Lenta     | 140 ± 5                       | 62 ± 5                                     |
| Rápida    | 285 ± 10                      | 125 ± 10                                   |

La secuencia que se utilizó para la preparación de la pasta se presenta en los siguientes puntos

1. Se agregan todos los conglomerantes.
2. Se adiciona el humo de sílice y el aditivo.
3. Se agregan los áridos gruesos y finos.
4. Se mezclan durante 30-50 seg.
5. Después de observar una mezcla homogénea se le agrega el agua.
6. Con todos los materiales agregados se espera que la mezcla se haga fluida para agregar las fibras.
7. Se adicionan las fibras y se espera 5 min o 10 min con el cual ya las fibras están completamente distribuida con la mezcla.

Este procedimiento se realizó con todas las fibras.

### 3.3.2 Proceso de moldeado.

Para el moldeado de las placas se procedía a verter la pasta en moldes hechos de madera con las siguientes dimensiones:

Largo: 300 mm. Ancho: 300 mm. Espesor: 20 mm.

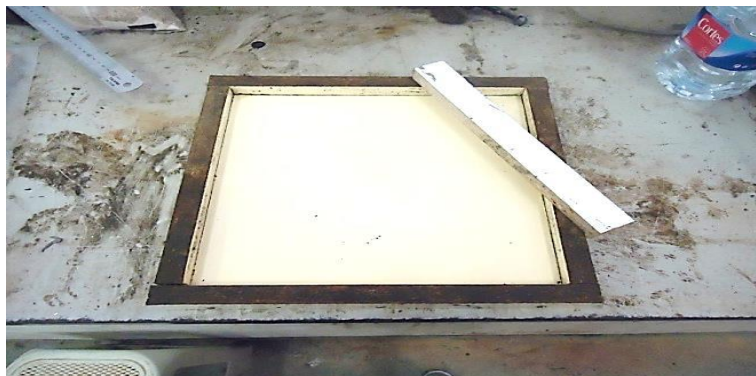


Figura 40 moldes de las placas.

Los moldes se dividían por la mitad con una pieza de madera con el cual por cada molde conseguíamos dos probetas. Como se muestra en la figura 40 estos moldes eran cuadrados.

Las probetas que se diseñaron fueron placas de 300mmx150mmx20mm. Para la preparación de las probetas se realizaron los siguientes pasos:

1. Limpiar los moldes con papel.
2. Aplicar desencofrante en toda la superficie del molde
3. Colocar la tabla dividiendo el molde en dos partes iguales.
4. Verter la mezcla en el molde de modo que quede a ras con el espesor del molde.

Antes de verter la pasta en los moldes primero se realizaba un ensayo de consistencia utilizando el método del cono de Abrams mediante este ensayo se mide la consistencia del hormigón. En este ensayo el hormigón se coloca en un molde metálico y se levanta de un golpe el molde, dejando que el hormigón corra y se esparza después que la mezcla termine de esparcirse se mide el diámetro que ha formado la mezcla. En los ensayos realizados para este trabajo se buscaba un cono de 21 cm como óptimo, con el cual se obtenía un hormigón autocompactante. El equipo utilizado se muestra en la figura 41.

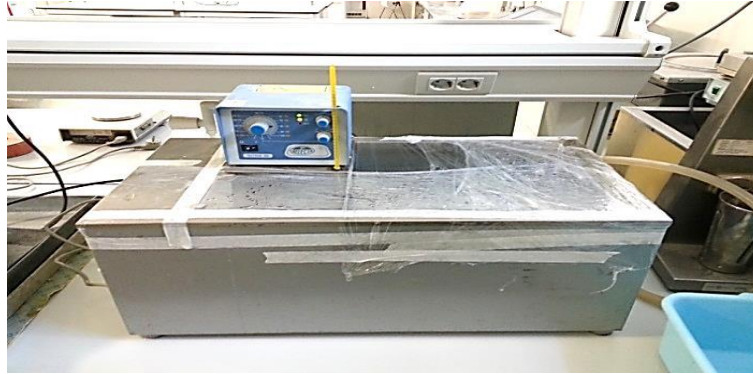


**Figura 41** Cono de Abrams para morteros.

### 3.3.3 Proceso de curado

Para el curado de las probetas se utilizó la cámara húmeda del instituto de ciencia del hormigón ICITECH de la universidad politécnica de valencia la cual cuenta con tres cámaras húmeda con diferentes características. La cámara húmeda utilizada para la curada tenía las siguientes características 23°C y 100% de humedad. También se realizó un curado especial el cual era un tratamiento térmico en el cual se introducían las placas después de 24 hr en la cámara húmeda en un bañador el cual contenía agua a una temperatura de 80°C. en la figura 42 se muestra el bañador utilizado para el tratamiento.





**Figura 42** Bañador para tratamiento de acelerado.

Este bañador tenía la capacidad de mantener la temperatura del agua a un nivel de 80 °C.

### 3.3.4 Proceso para la realización de los ensayos a flexo traccion.

Para los ensayos de flexo traccion de todas las muestras analizadas se ha utilizado una prensa Instron 3282 (Figura 43) la cual consta de:

- Bastidor con capacidad máxima de carga de 100 kN
- Células de carga de 5 kN y 100 kN
- Soporte de dos apoyos ajustables para muestras de hasta 50 mm de ancho
- Aplicadores de cargas de uno y dos puntos para muestras de hasta 50 mm de ancho.
- Soporte de dos apoyos ajustables para muestras de hasta 400 mm de ancho
- Aplicador de una carga para muestras de hasta 350 mm de ancho.
- Placas platos de soporte y aplicador de carga para ensayos de compresión.
- Software Bluehill para ensayos estáticos.

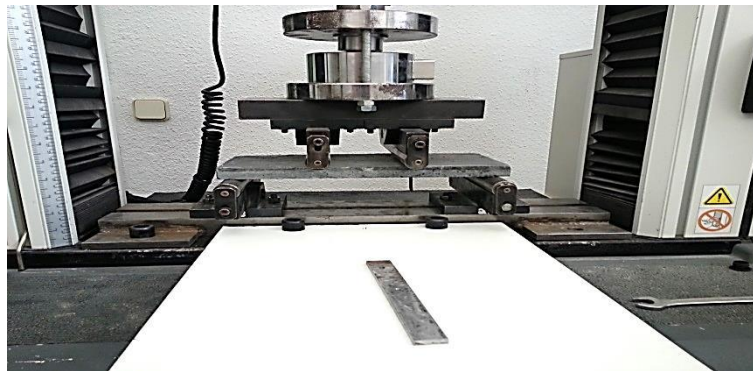
Principales características de la nueva industria incluyen carga de precisión de la medición a +/- 0,5% de la lectura hasta 1/1000 de la capacidad de la célula de carga y las tasas rápidas y sincronizadas de adquisición de datos de hasta 2500 puntos por segundo. Los usos más comunes de estos sistemas de pruebas mecánicas son para la tracción, compresión, flexión, pelado, corte, desgarro y ensayos cíclicos.

El panel de control es un componente integral del sistema de pruebas, reducir el tiempo de prueba y aumentar la eficiencia a través del uso de las pantallas en directo programables y teclas de función. Las pruebas se pueden configurar y ejecutar directamente desde el panel de control.



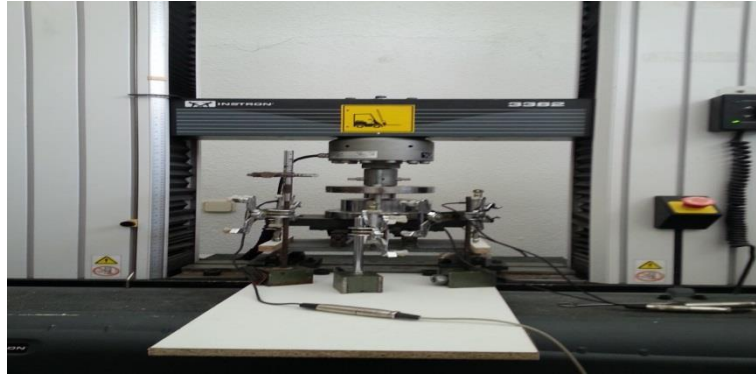
**Figura 43** Prensa Instron.

La colocación de las placas se hacían colocando las muestras sobre dos apoyos transversales uno siendo fijo y el otro con movilidad. En la figura 44 se puede observar una muestra colocada en la prensa.



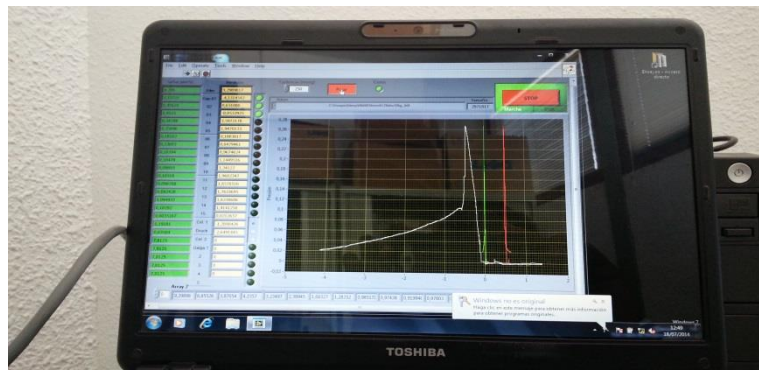
**Figura 44** Placa puesta en la prensa

Después de tener las muestras colocadas en la prensa se procedía a la colocación de los medidoras de deformación se colocaban dos medidores a lo largo de una barra metálica que se unía a la muestra, la muestra se pegaba con silicona. En la figura 45 se muestra una muestra con los medidores.



**Figura 45** muestra con medidores de deformación.

Los medidores iban conectado a una central la cual mostraba los datos obtenidos en un ordenador en el cual se observa la gráfica fuerza-deformación. Véase figura 46.



**Figura 46** Ordenador con la gráfica Fuerza-deformación de una muestra.

## Capitulo IV. Resultados y Análisis.

---

## 4.1 Características de las muestras

Como respuesta a los objetivos planteados en el Capítulo I y como resumen de los resultados del estudio, se plantean a continuación los resultados más relevantes obtenidos del estudio experimental.

Las muestras utilizadas fueron las descritas en el acápite anterior estas probetas tenían las siguientes características (tabla 12):

**Tabla 12** Características de las probetas.

| Características de las probetas |          |               |                   |               |                               |              |                                  |
|---------------------------------|----------|---------------|-------------------|---------------|-------------------------------|--------------|----------------------------------|
| Tipo de fibra                   | Probetas | A: Ancho.(cm) | L: Largo/luz.(cm) | C: Canto.(cm) | V: Volumen.(cm <sup>3</sup> ) | M: Masa.(kg) | μ: Densidad.(kg/m <sup>3</sup> ) |
| 6mm                             | 1        | 14,0          | 30                | 2,0           | 840,0                         | 1,94         | 2,30                             |
|                                 | 2        | 14,0          | 30                | 1,8           | 756,0                         | 1,93         | 2,56                             |
| 12mm                            | 1        | 14,0          | 30                | 1,8           | 756,0                         | 1,85         | 2,44                             |
|                                 | 2        | 14,5          | 30                | 2,0           | 870,0                         | 1,85         | 2,13                             |
| 12mm AC                         | 1        | 14,5          | 30                | 1,8           | 783,0                         | 1,86         | 2,37                             |
|                                 | 2        | 14,1          | 30                | 1,9           | 803,7                         | 1,91         | 2,38                             |
| 18mm                            | 1        | 14,0          | 30                | 1,9           | 798,0                         | 2,33         | 2,91                             |
|                                 | 2        | 14,1          | 30                | 1,8           | 761,4                         | 2,32         | 3,04                             |
| 24mm                            | 1        | 14,1          | 30                | 1,9           | 803,7                         | 1,77         | 2,19                             |
|                                 | 2        | 13,9          | 30                | 1,8           | 750,6                         | 1,71         | 2,27                             |
| 36mm                            | 1        | 13,8          | 30                | 2,0           | 828,0                         | 1,94         | 2,34                             |
|                                 | 2        | 14,0          | 30                | 1,9           | 798,0                         | 2,27         | 2,84                             |

## 4.2. Consistencia y Tiempo de Mezclado.

Los tiempos de mezclado y el valor de la consistencia de las probetas fueron parámetros que se analizaron y estos dependían del tipo de fibra que se utilizaba en las amasadas. Se determinó un patrón que a mayor tamaño de las fibras más fluido era la amasada y a menor tamaño de las fibras la fluidez de la mezcla bajaba considerablemente. En la tabla 13 se podrán observar los valores obtenidos de las diferentes amasadas.

**Tabla 13** Consistencia de las diferentes tipos de fibras.

| Material de la fibra | Tipo de Fibras (mm) | Tiempo de mezclado (min) | Consistencia (cm) |
|----------------------|---------------------|--------------------------|-------------------|
| Vidrio               | 6                   | 5                        | 13                |
| Vidrio               | 12                  | 5                        | 19                |
| Vidrio               | 12                  | 5                        | 22                |
| Vidrio               | 18                  | 5                        | 19,25             |
| Vidrio               | 24                  | 5                        | 25                |
| Vidrio               | 36                  | 5                        | 24,75             |
| Acero                | 13                  | 5                        | 25                |
| Sintéticas           | 45                  | 5                        | 26                |
| Sintéticas           | 0,2                 | 5                        | 16                |
| Vidrio               | 6                   | 10                       | 13,25             |
| Vidrio               | 12                  | 10                       | 20                |
| Vidrio               | 12                  | 10                       | 22                |
| Vidrio               | 18                  | 10                       | 20                |
| Vidrio               | 24                  | 10                       | 26                |
| Vidrio               | 36                  | 10                       | 25                |
| Acero                | 13                  | 10                       | 27                |
| Sintéticas           | 45                  | 10                       | 27                |
| Sintéticas           | 0,2                 | 10                       | 18                |

En la figura 47 se observa la relación que hay entre el tiempo de mezclado y la consistencia a través de un gráfico de barras de los diferentes tipos de fibras de vidrio y en la figura 48 se muestra la relación entre las fibras de acero y las sintéticas.

## Fibras vs Consistencia

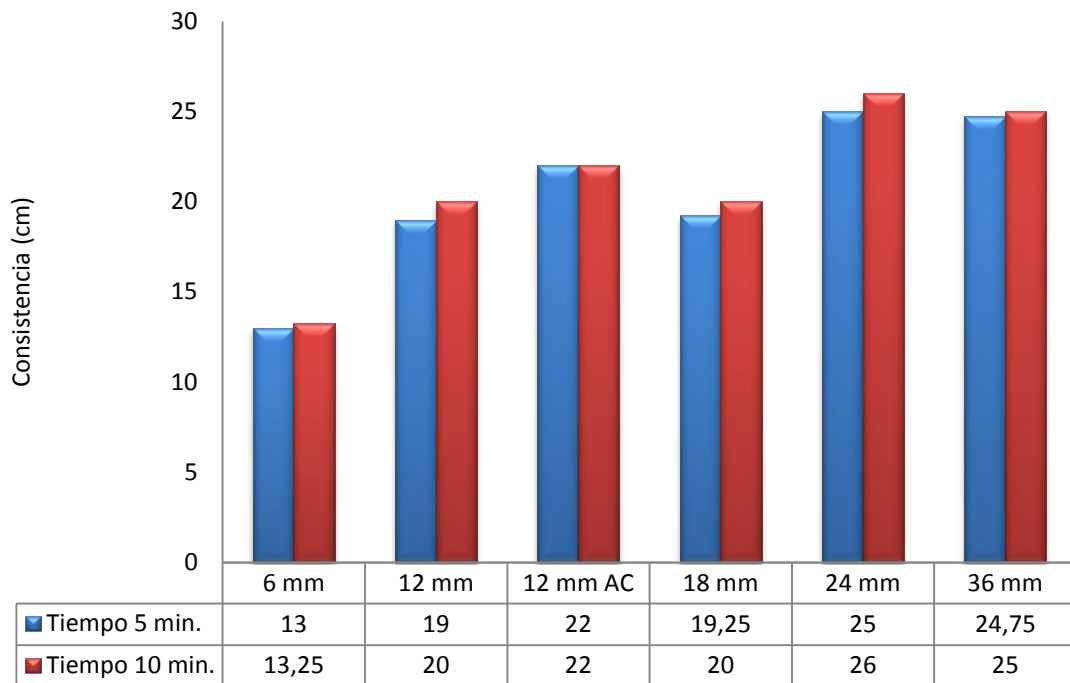


Figura 47 Grafica de barras fibras vs consistencia.

Como se puede observar la consistencia de las fibras era más grande a mayor tiempo de mezclado pero la diferencia entre las consistencia no era muy diferentes sin importar que el tiempo de mezclado se duplicaba. En la figura 48 se puede comparar mejor la relación para los dos tiempos de mezclado.

## Fibras vs Consistencia

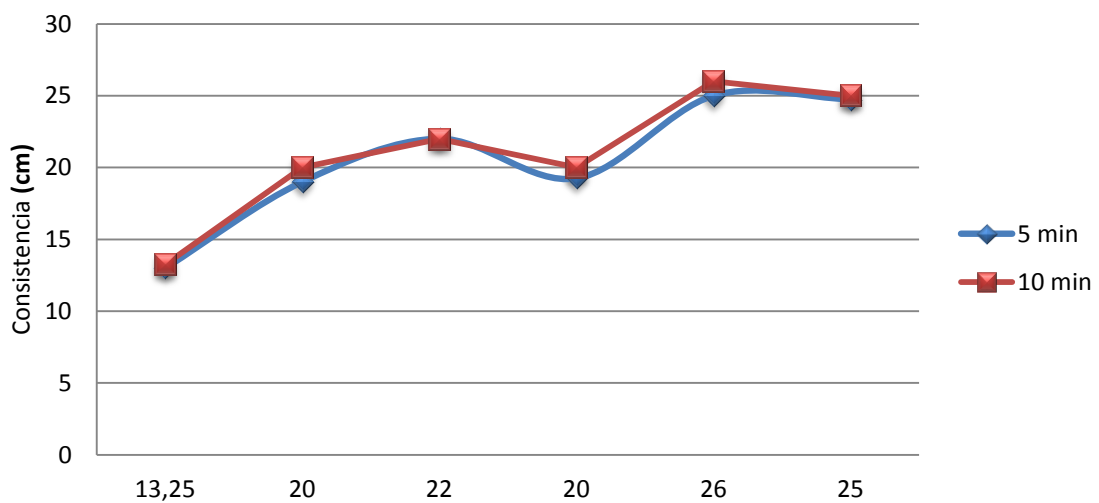


Figura 48 Fibras vs consistencia a diferentes tiempos de mezclado.

### 4.3 Comportamiento a la rotura.

Se observó la adherencia de las fibras de vidrios con la matriz de hormigón para conocer la forma de rotura de las fibras las cuales podrían ser de dos formas:

- Por rotura de las fibras al llegar a su estado limite.
- Por desprendimiento de la matriz por falta de adherencia.

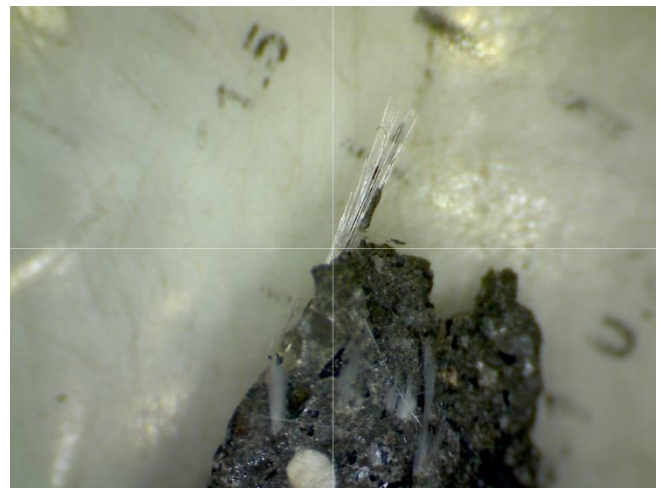
Para poder ver la forma de rotura se procedió a ver las muestras con un microscopio digital los cual nos permitió tomar fotografías y así poder observar la unión fibra-matriz.



**Figura 49** *Fibras de vidrio en la matriz de hormigón.*



**Figura 50** *Matriz con fibras de vidrio*

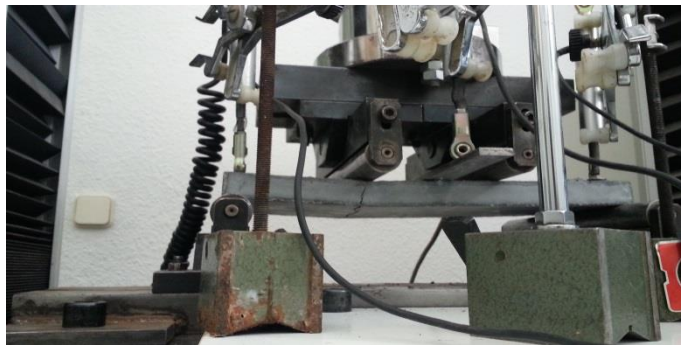


**Figura 51** *Fibras de vidrios adheridos en la matriz.*

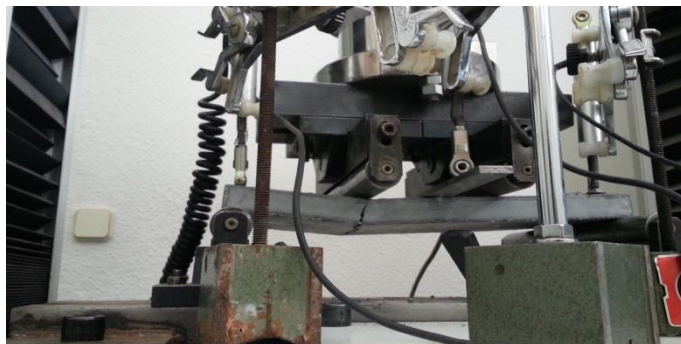




**Figura 52** Fisura en muestra con fibras de vidrio de 36 mm.



**Figura 53** Fisura en muestra con fibras de vidrio de 36 mm.

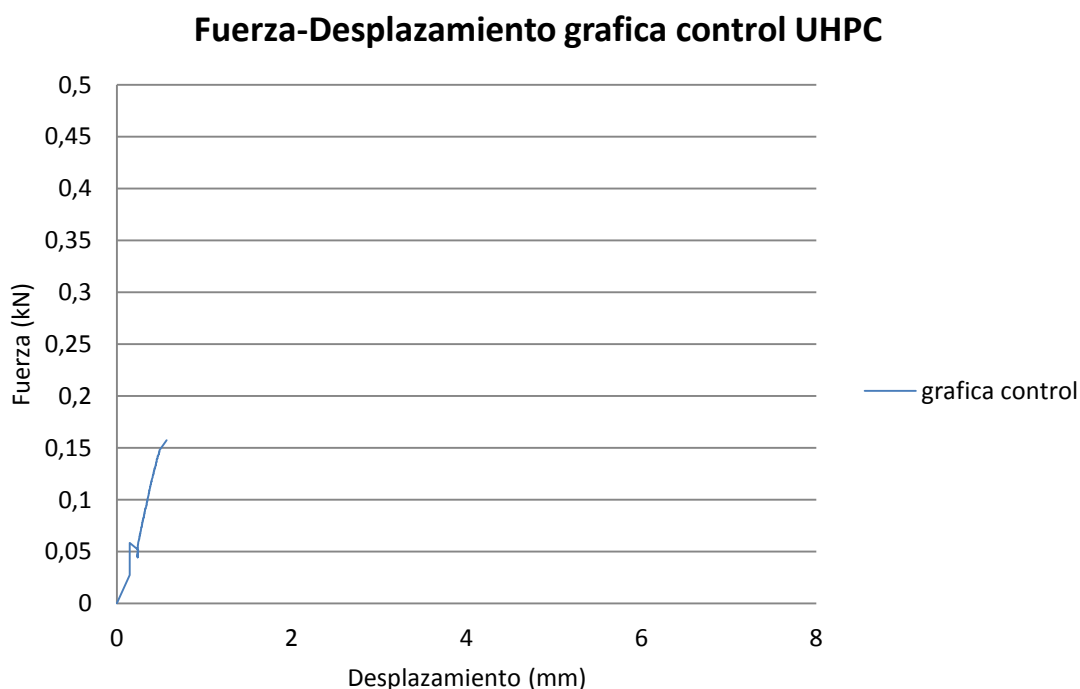


**Figura 54** Fisura en muestra con fibras de vidrio de 36 mm.

En las figuras 52, 53 y 54 se muestra una secuencia de como al aparecer la primera fisura las fibras de vidrio intentan sella esta fisura dándole una ductilidad al UHPC. Para la realización de estos ensayos no se pudo conseguir un buen apoyo al momento de cargar las muestras y esto incurrió en que las muestras llegaba a rotar o alterar los valores iniciales debido al asentamiento de estas en los apoyos, debido a este problema se utilizaron varios catadores para tratar de controlar mejor las rotaciones y los desplazamientos.

#### 4.4 Ensayos de resistencia a flexo traccion de probetas curadas a 28 días.

En las siguientes figuras observaremos los valores de fuerza vs desplazamiento de las muestras sometidas a un ensayo de flexo traccion a 4 puntos. En primer lugar se presentara la gráfica control la cual se tomara de referencia para futuras comparaciones.

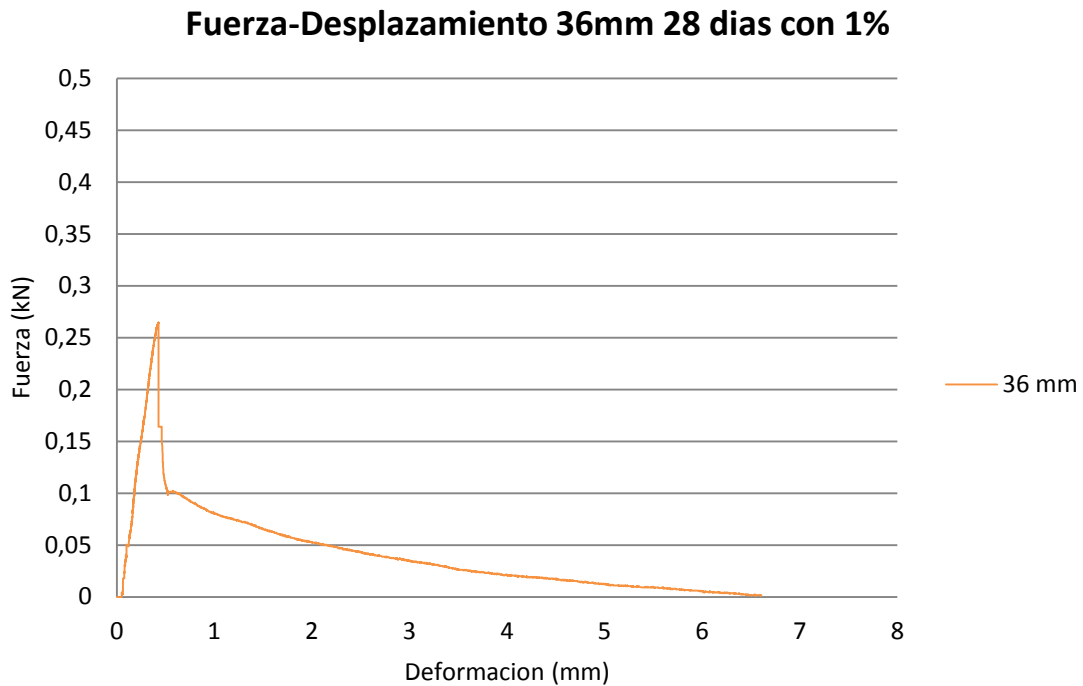


**Figura 55** Muestra de UHPC sin refuerzo ensayada a 28d con 1% de  $f_v$  en su dosificación.

Como se puede observar el comportamiento es muy frágil llega a un pico y se produce la rotura. También se puede observar que la deformación no es muy buena por lo que el material no ofrece mucha ductilidad.

Los gráficos tienen diferentes comportamientos según el tipo de fibra que se haya utilizado.

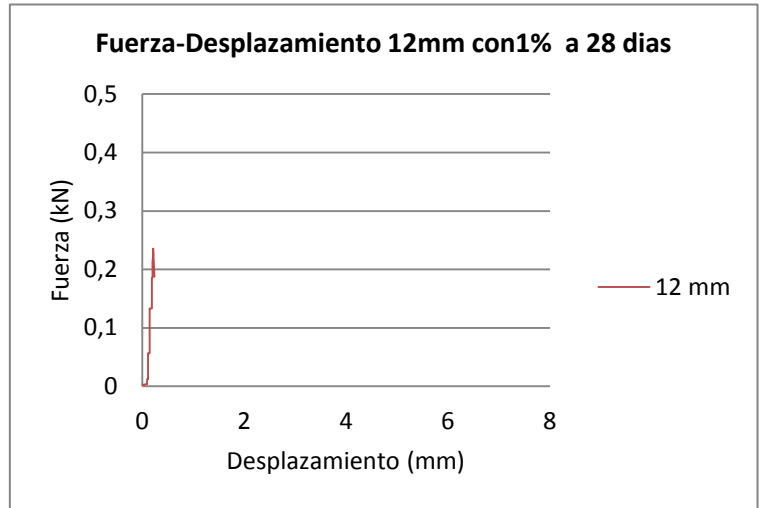
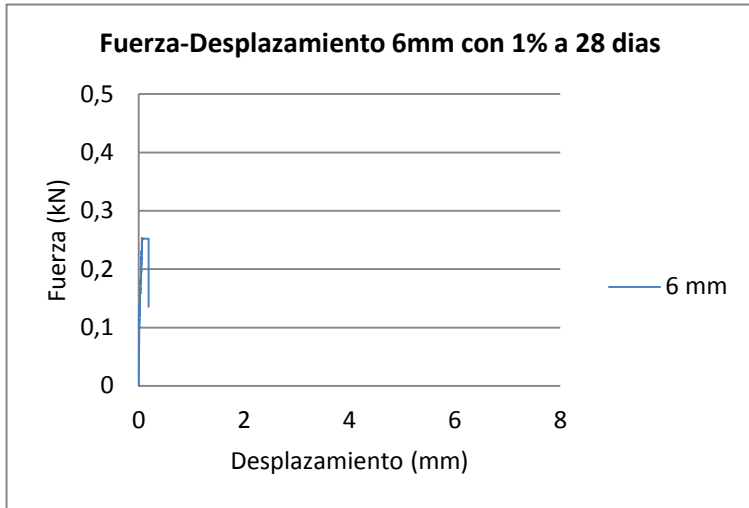
Se pueden observar todas las gráficas individualmente, cabe destacar que las fibras de 6 mm y 12 mm presentaban un comportamiento frágil, se puede ver en las gráficas, que las roturas son frágiles ya que no tienen zona de descarga y no ofrecen nada de ductilidad a las muestras de UHPC, pero se nota una mejoría en la resistencia a la carga de más de un 100% en ambas muestras. Por otra parte las fibras de mayor tamaño (12mm Anti-crack, 18mm, 24mm y 36mm) muestran una mejoría considerable tanto como en la resistencia a la carga y su ductilidad. En la figura 56 se muestra la probeta con fibras de 36 mm.



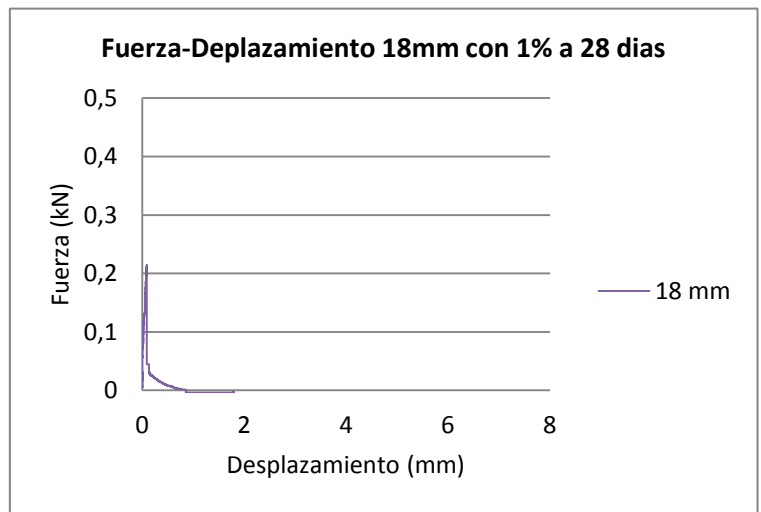
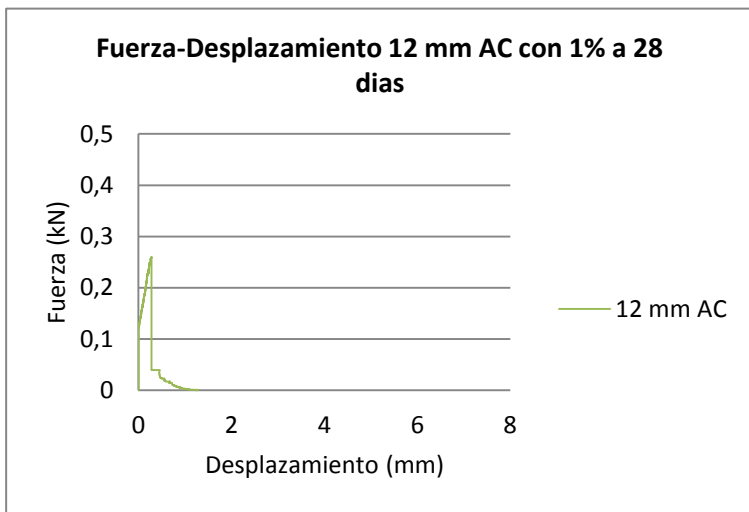
**Figura 56** Muestra con fibras de 36 mm ensayada a 28d con 1% de  $f_v$  en su dosificación

En esta grafica se ve que la ductilidad es mayor y la resistencia a la carga también con relación a la muestra control. Pero comparando esta con las otras muestras que contienen fibra de vidrio se observa que la que mayor resistencia a la carga la ofrece la muestra de 6 mm pero la de 36 mm ofrece la mejor capacidad en término de ductilidad.

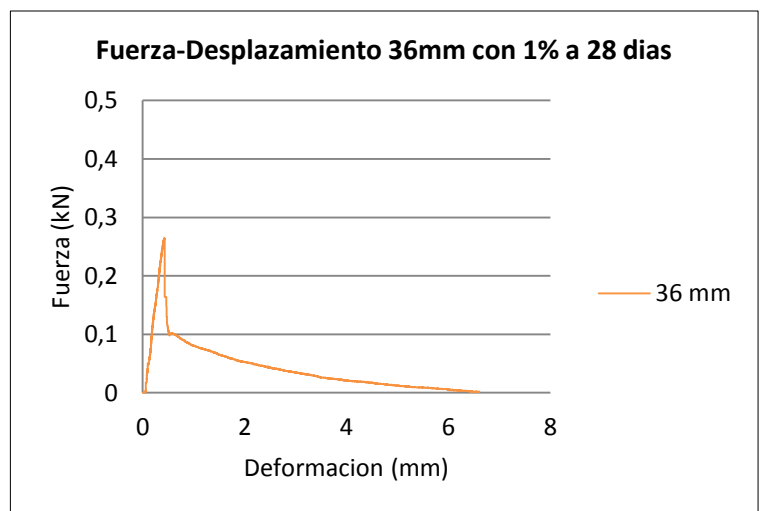
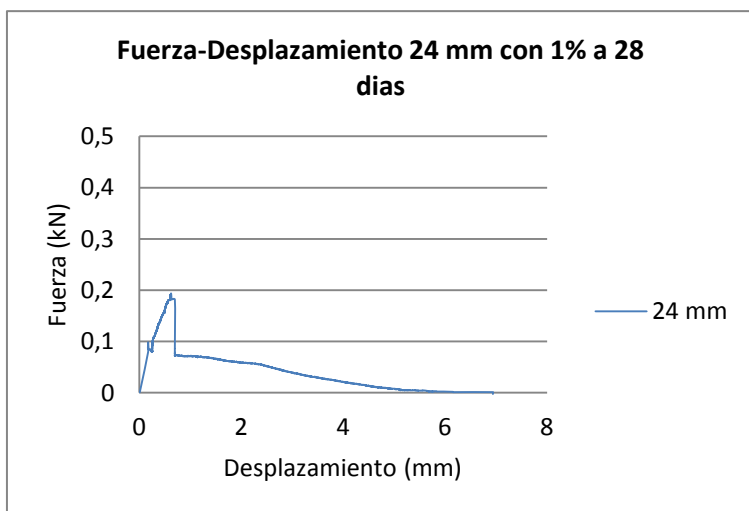
Se muestran todas las gráficas obtenidas de las muestras con fibras de vidrio y se observa la mejora tanto en la ductilidad como en la resistencia a la carga estas graficas son de las muestras que contenían un 1% de contenido de fibras.



**Figura 57** Izquierda muestra con fibras de 6 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 12 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación.



**Figura 58** Izquierda muestra con fibras de 12 mm AC ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 18 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación.



**Figura 59** Izquierda muestra con fibras de 24 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 36 mm ensayada a 28d con 1% de fv en su dosificación

En la figura 60 se observa mejor los valores de la resistencia a la carga.

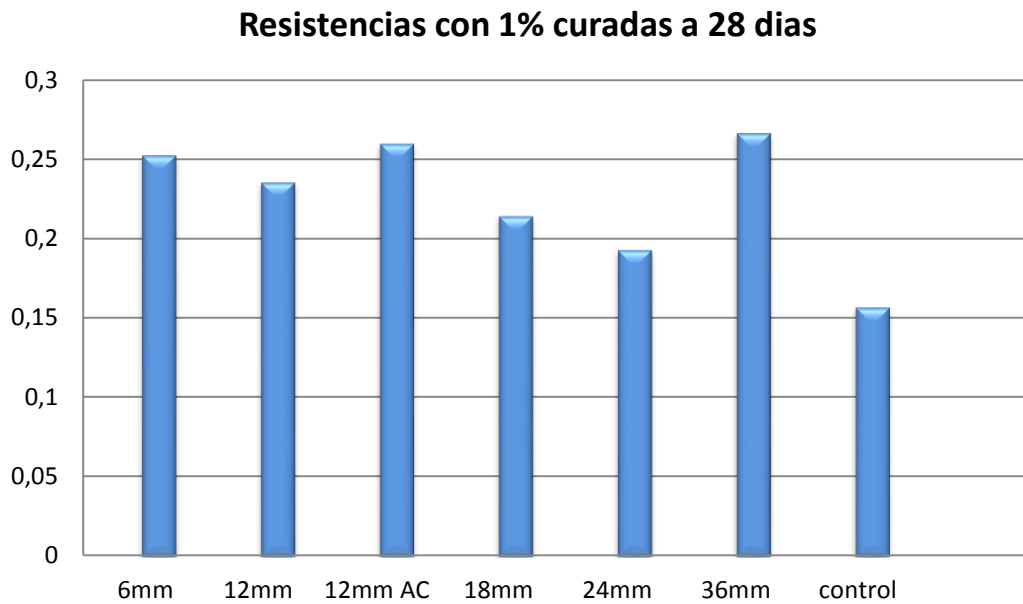


Figura 60 Capacidad de carga de las muestras a 28d con 1% de  $f_v$  en su dosificación.

Las siguientes graficas son las gráficas fuerza-desplazamiento con muestras con un 2 % de volumen de fibras de vidrio en su dosificación. Estas graficas tienen un comportamiento un poco más homogéneo que las muestras con un 1% de fibras en su dosificación. Y mejoran también la resistencia a la carga y la ductilidad de la mezcla.

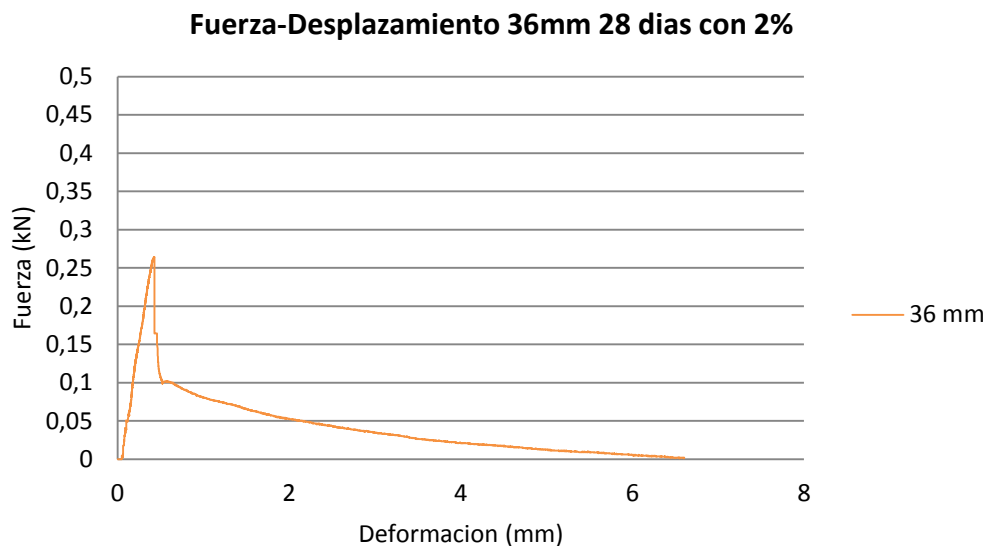
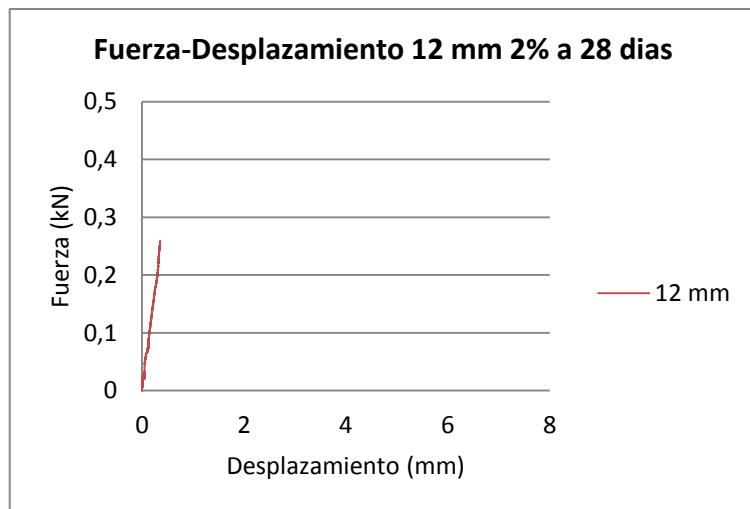
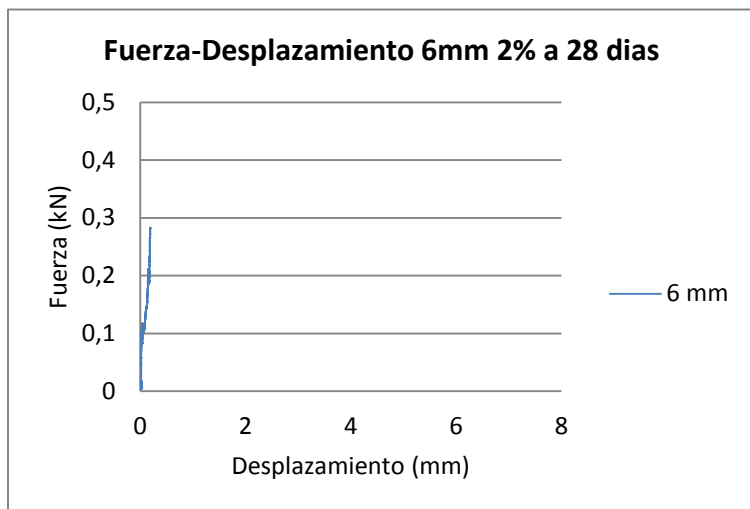
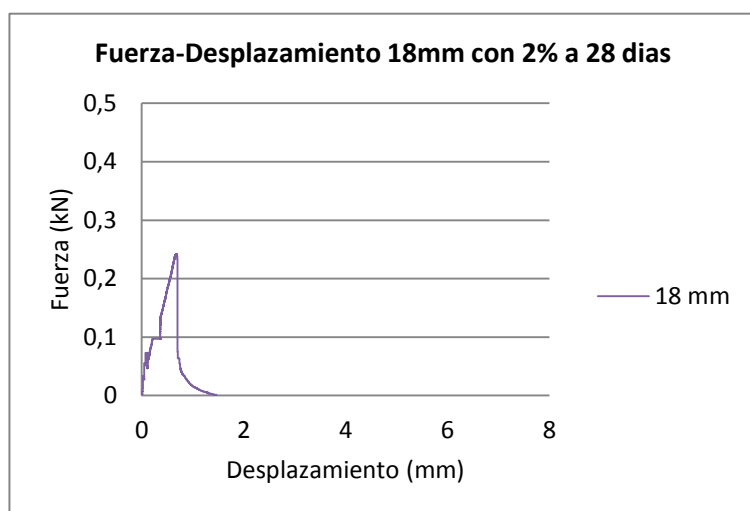
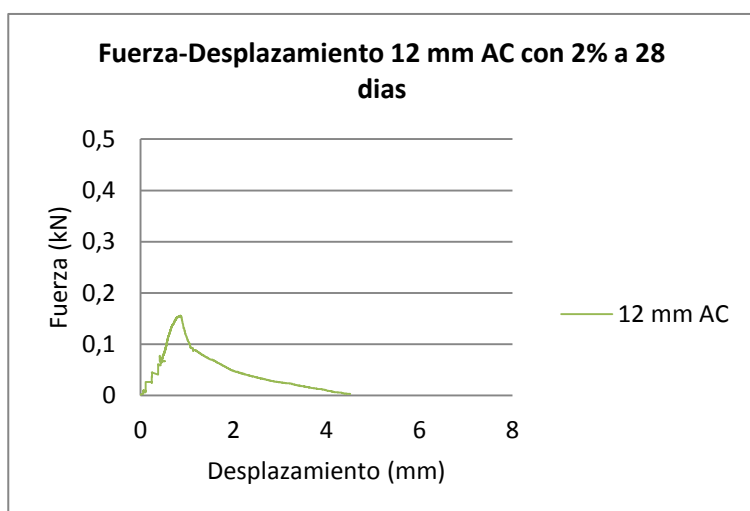


Figura 61 Muestra con fibras de 36 mm ensayada a 28d con 2% de  $f_v$  en su dosificación.

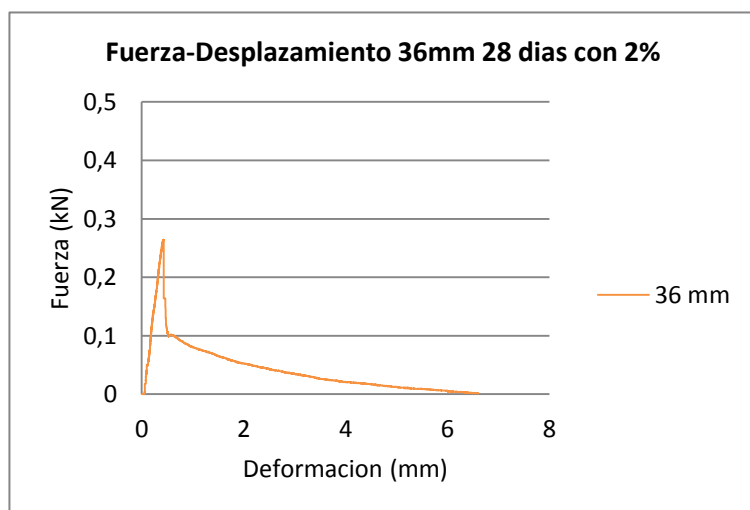
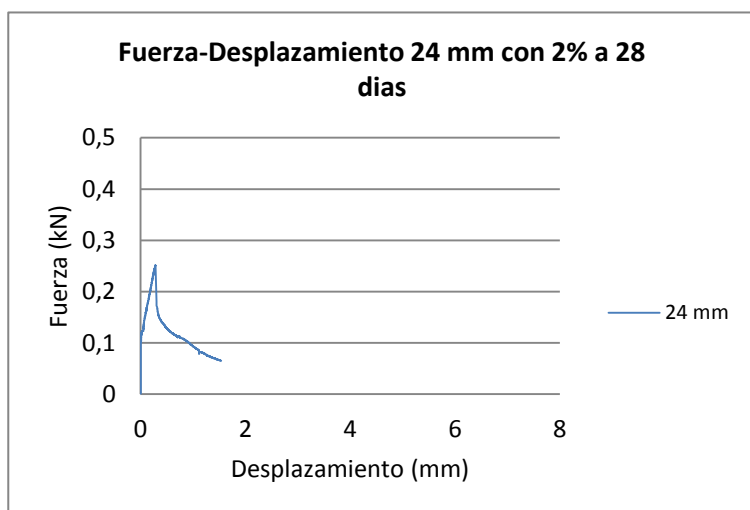
En la gráfica 61 se nota la mejoría en la capacidad de carga y la ductilidad.



**Figura 62** Izquierda muestra con fibras de 6 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 12 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación.

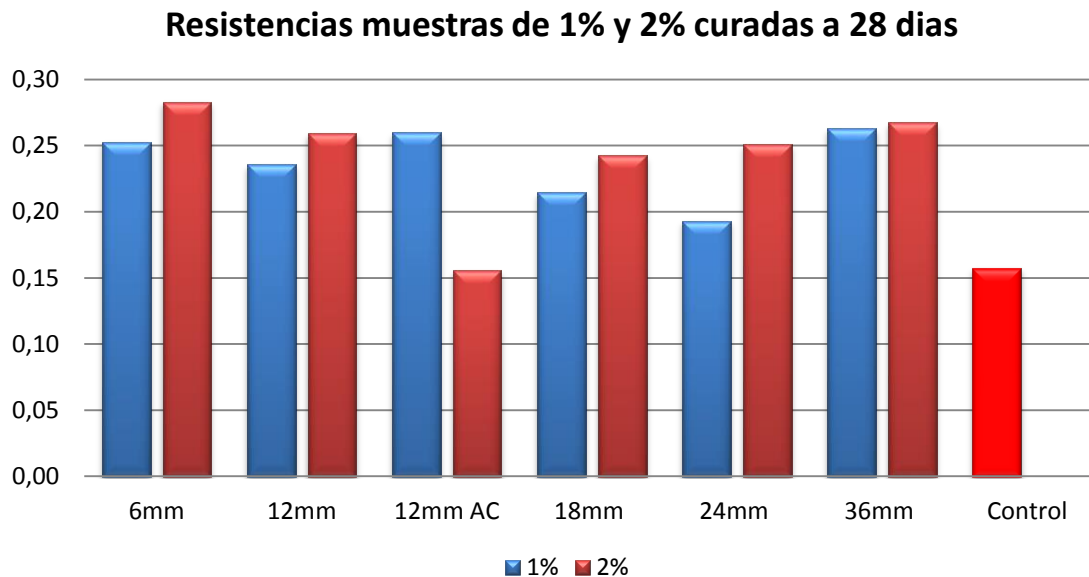


**Figura 63** Izquierda muestra con fibras de 12 mm AC ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 18 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación.



**Figura 64** Izquierda muestra con fibras de 24 mm AC ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 36 mm ensayada a 28d con 2% de fv en su dosificación.

Todas las gráficas con un 2% de contenido mejoraron la capacidad de carga y la ductilidad que las que tenían un 1%. Aunque se ha duplicado el contenido de fibra no se nota una gran diferencia en la capacidad de carga en la gráfica 7 se comparan las fuerzas de las muestras de con un 1% y 2%.



**Figura 65** Capacidad de carga de las muestras con 1% y 2% de fv en su dosificación.

#### 4.4.1 Ensayos de resistencia a flexo traccion de probetas curadas a 90 días.

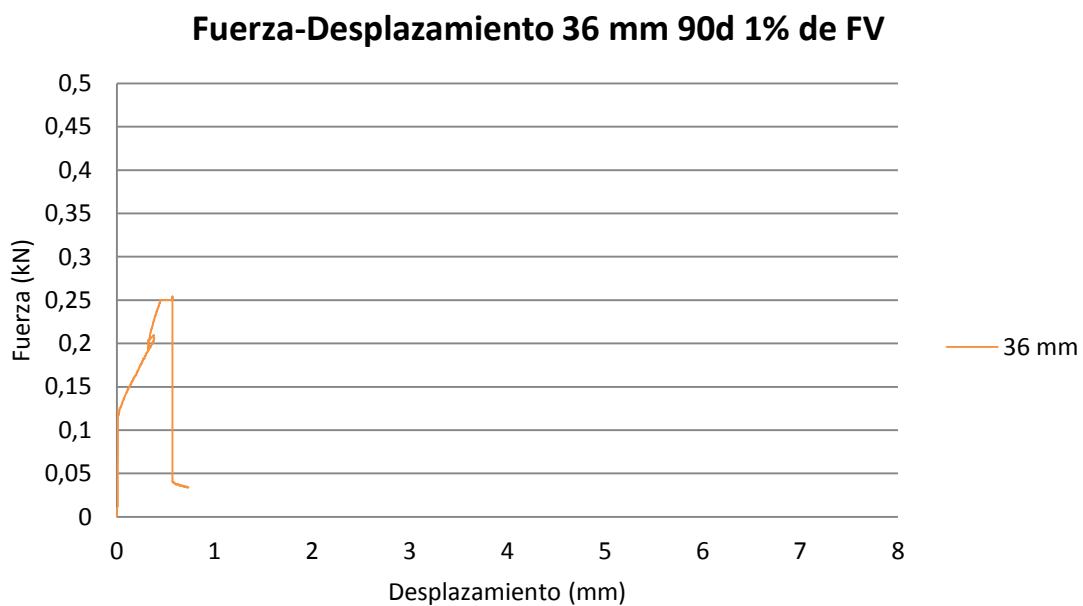
Las probetas se curaron a diferentes edades en el acápite anterior se mostraron las curadas a 28 días con varios contenidos en este se mostraran las curadas a 90 días. Y se analizara el comportamiento que adoptan estas. En la gráfica se mostrara la gráfica control comparada con las muestras curadas a 90 días.

En las gráficas de 6mm y 12mm se observa que las muestras curadas a 90 días con 1% de contenido de fibras siguen teniendo un comportamiento frágil pero se nota una mejora en la capacidad de carga con relación a las muestras curadas a 28 días.

Estas graficas muestran también un comportamiento diferente a las curadas a 28 días ya que las gráficas formaban una parábola cóncava hacia abajo a diferencia de las curadas a 90 días que presentan un comportamiento de parábolas cóncava hacia arriba. Se mantiene que la meseta que forman las gráficas es cuando el UHPC llega a la fisura y las fibras comienzan a trabajar y muestra una ayuda en la capacidad de carga.

En las gráficas con muestras de 12mm AC, 18mm, 24mm y 36 mm se observa la misma tendencia en el comportamiento de las gráficas, también se puede apreciar que en la capacidad de carga de todas las gráficas ha mejorado con relación a las curadas a 28 días.

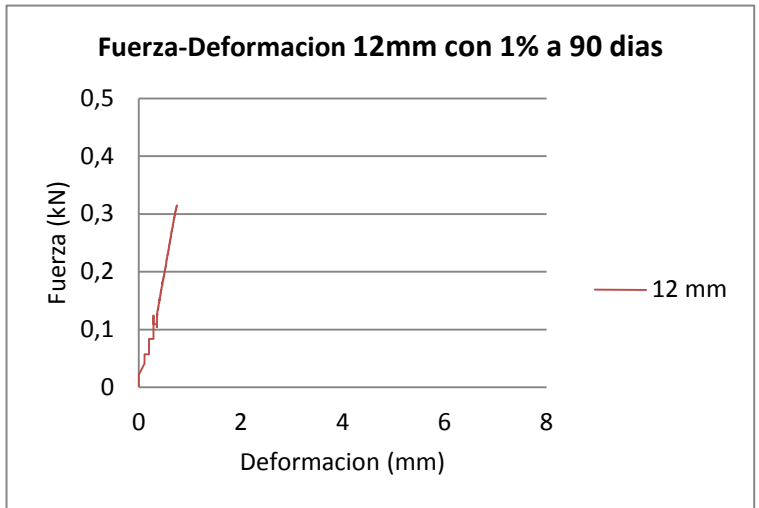
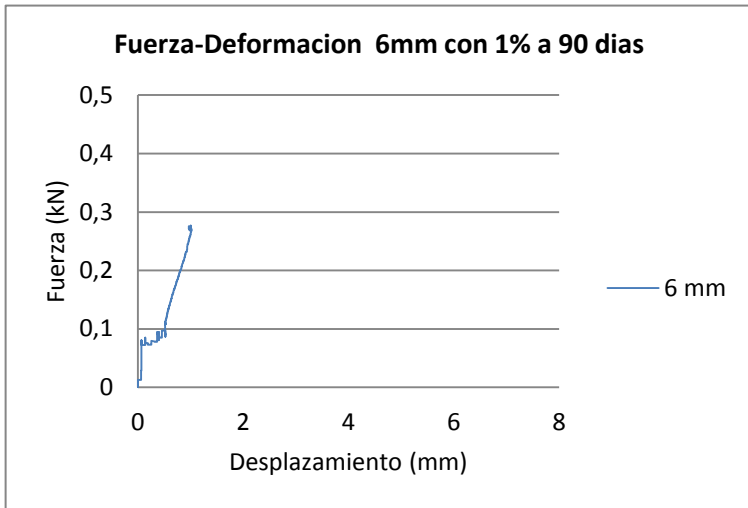
Pero ninguna de las muestras presenta mejora en la ductilidad por lo que se puede apreciar que la durabilidad se ha ido degradando, las muestras no muestran ninguna zona de descarga. Se prevé que las fibras de vidrio se han ido degradando con el tiempo y es por lo cual no se obtiene mejora en la ductilidad. En la gráfica se observa la muestra control comparadas con las muestras con fibras de vidrio.



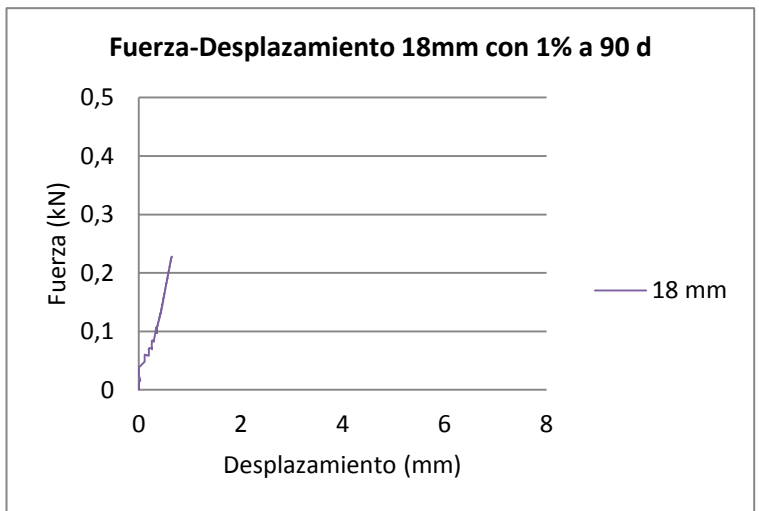
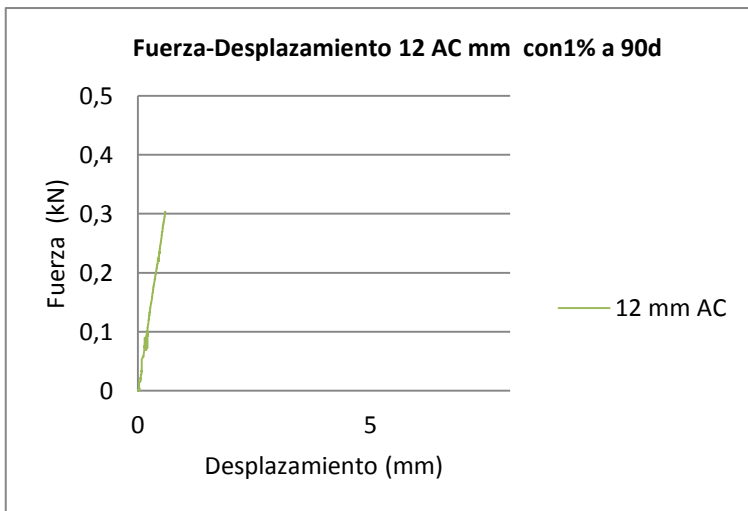
**Figura 66** Muestra con fibras de 36 mm curada a 90 días con 1%.

Las siguientes graficas son las gráficas fuerza-desplazamiento con muestras con un 1 % de volumen de fibras de vidrio en su dosificación curadas a 90 días.

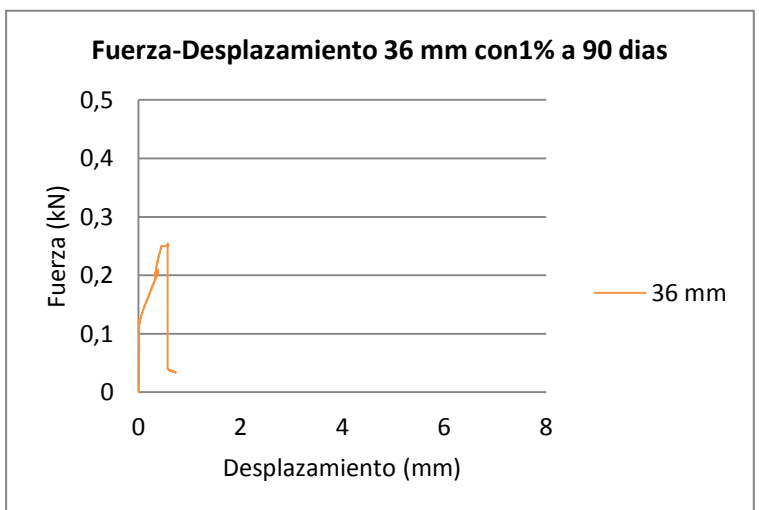
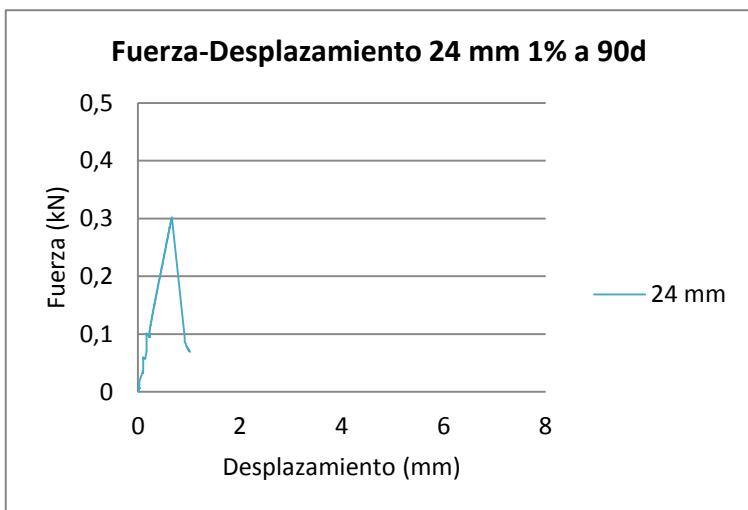




**Figura 67** Izquierda muestra con fibras de 6 mm AC ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 12 mm ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación.



**Figura 68** Izquierda muestra con fibras de 12 mm AC ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 18 mm ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación.



**Figura 69** Izquierda muestra con fibras de 24 mm ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 36 mm ensayada a 90d con 1% de fv en su dosificación.

Se puede observar que la gráfica control tiene una zona de cargar muy atípica pero se observa que se estabiliza en el mismo punto en que aparece la meseta en las muestras que contienen fibras de vidrio, por lo que se asume que es cuando aparece la primera fisura en la muestra y se observa la mejora debido a la incorporación de las fibras. En la figura 70 se observa la mejora de las fuerzas.

### Resistencias con 1% curadas a 90 días

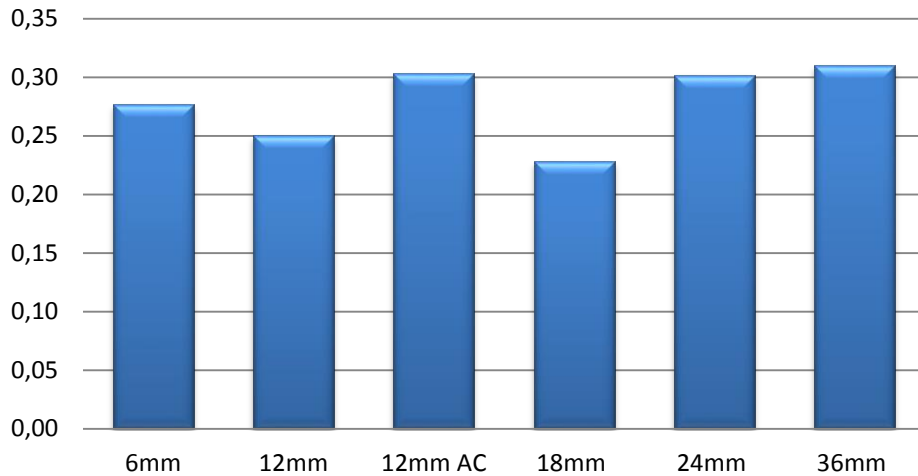


Figura 70 Capacidad de carga de las muestras a 90d con 1% de fv en su dosificación.

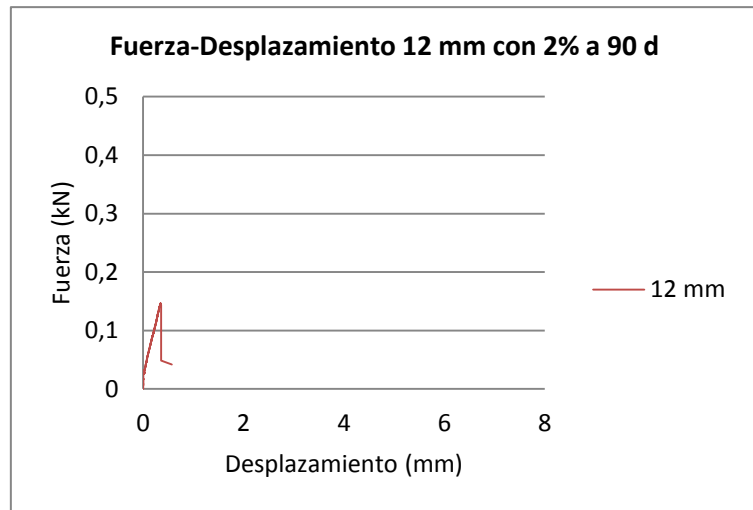
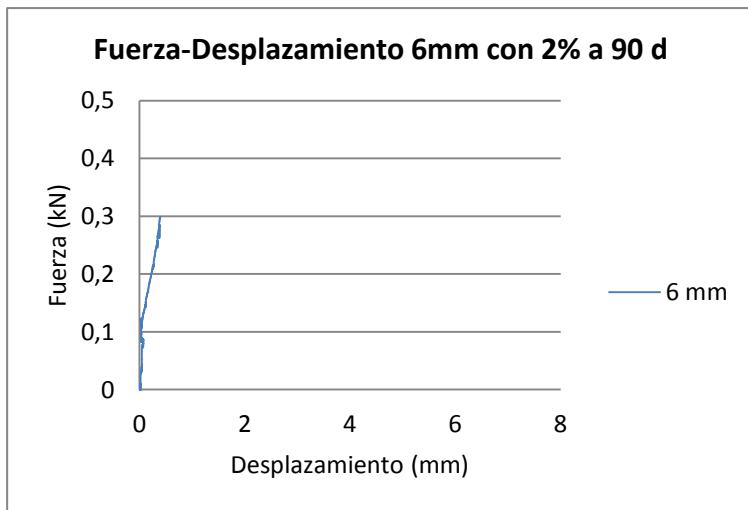


Figura 71 Izquierda muestra con fibras de 6 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 12 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación.

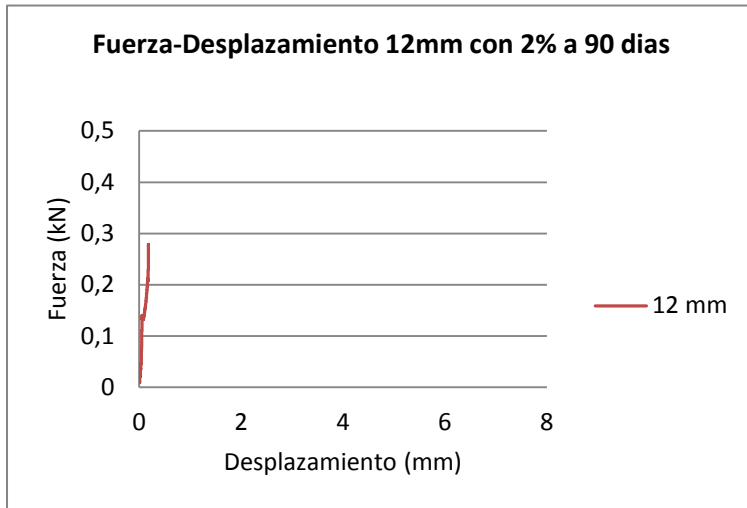


Figura 72 Izquierda muestra con fibras de 12 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 18 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación.

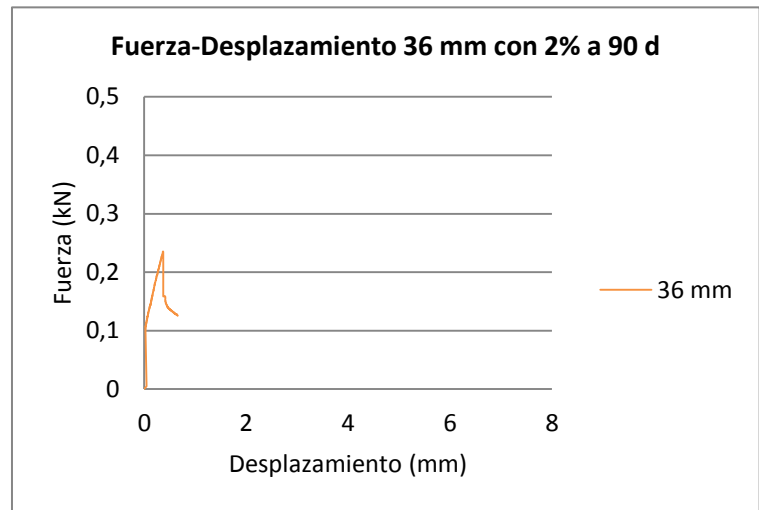
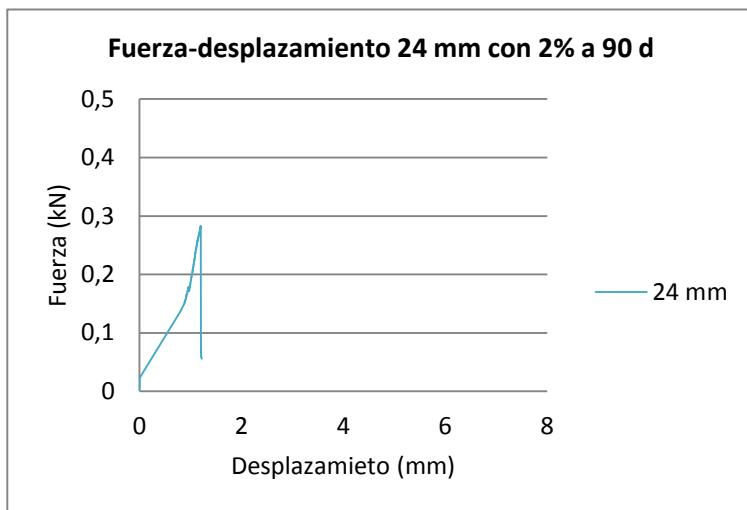
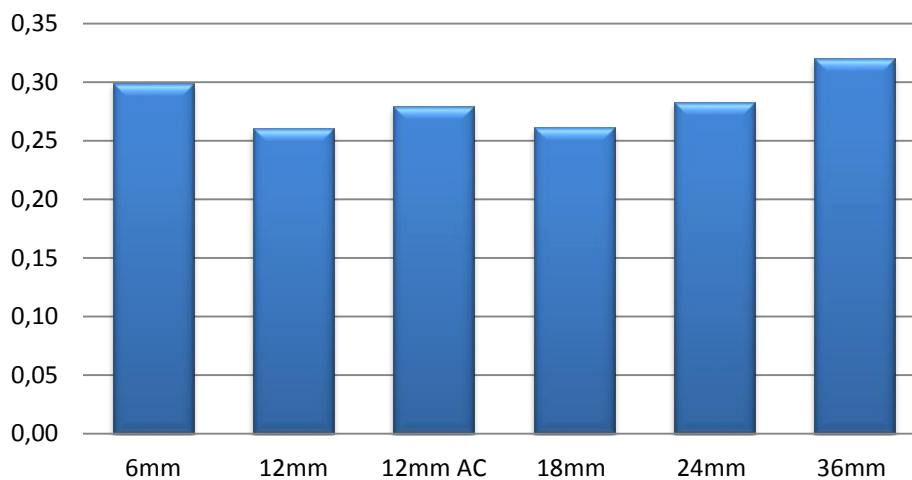


Figura 73 Izquierda muestra con fibras de 24 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación, derecha muestra con fibras de 36 mm ensayada a 90d con 2% de fv en su dosificación.

### Resistencias con 2% curadas a 90 días



Gráfica 1 Capacidad de carga de las muestras a 90d con 2% de fv en su dosificación.

### Resistencias con diferentes contenidos y edades de curado

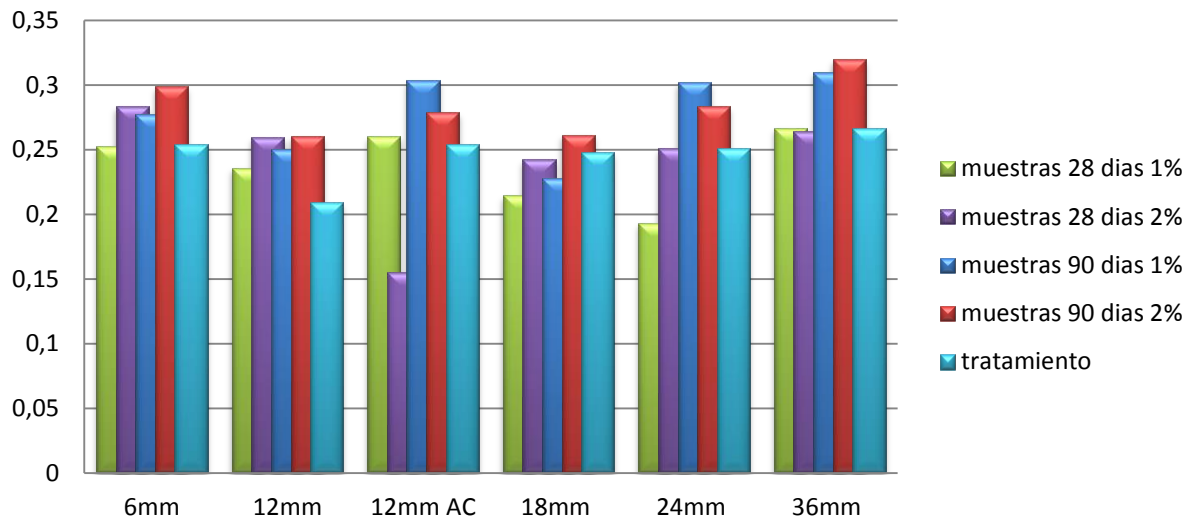


Figura 74 Capacidad de carga de las muestras curadas a 28 d y 90 d con dosificación de 1% y 2%.

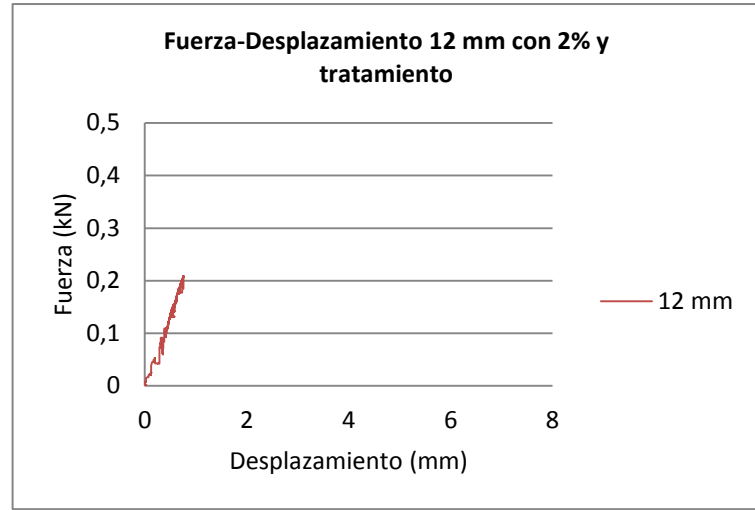
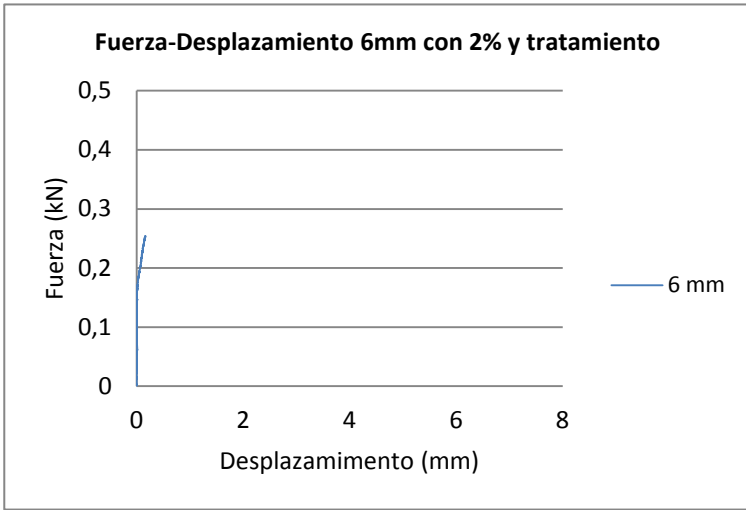
La figura 74 muestra las diferentes fuerzas que obtienen las muestras a diferentes periodos de curado.

#### 4.4.2 Ensayos de resistencia a flexo traccion de probetas con tratamiento de envejecimiento.

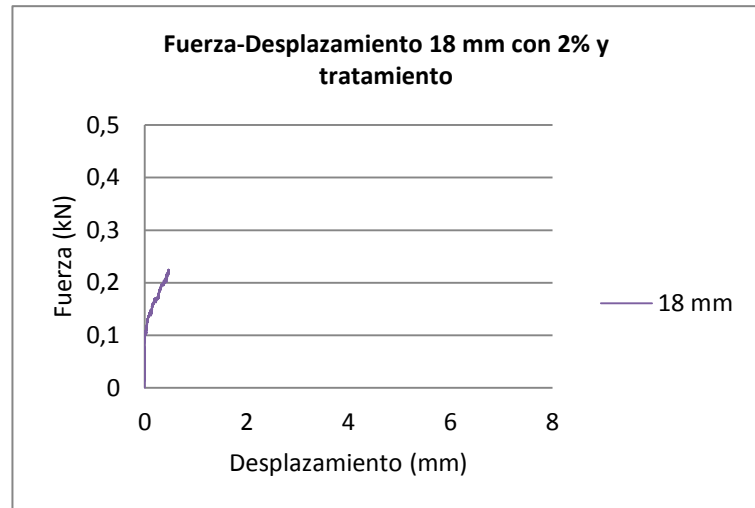
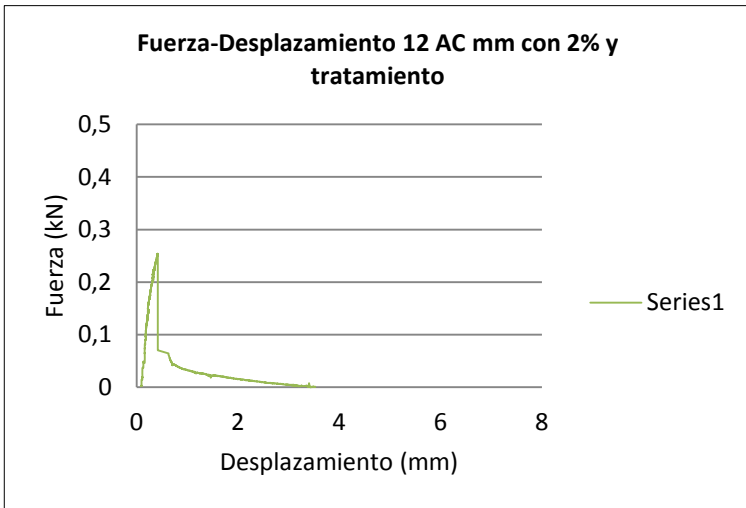
Otro de los ensayos realizados sobre las probetas fue el curado especial de las probetas con un tratamiento acelerado con el cual se buscaba acelerar el envejecimiento de las muestras para conocer el comportamiento tanto a ductilidad como la durabilidad de las fibras. .

El comportamiento es similar a las muestras de 6 mm y 12 mm las cuales no presentan mejora en la ductilidad pero si aportan a la resistencia a la carga. Y las fibras de mayor tamaño mejoran la ductilidad y la capacidad de carga.

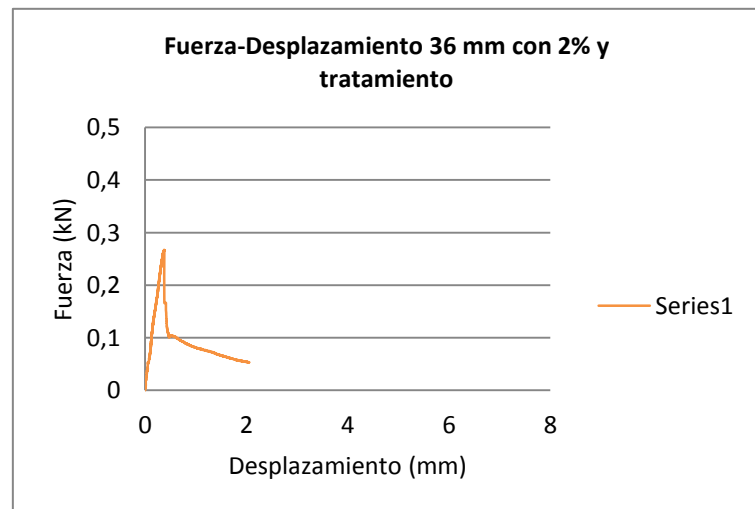
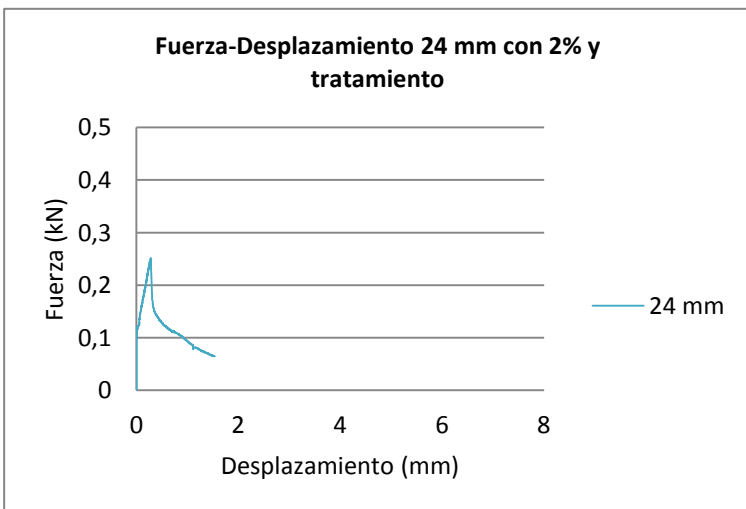
Las siguientes graficas son las obtenidas de los ensayos a flexo traccion con el método a 4 puntos.



**Figura 75** Izquierda muestra con fibras de 6 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado, derecha muestra con fibras de 12 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado.

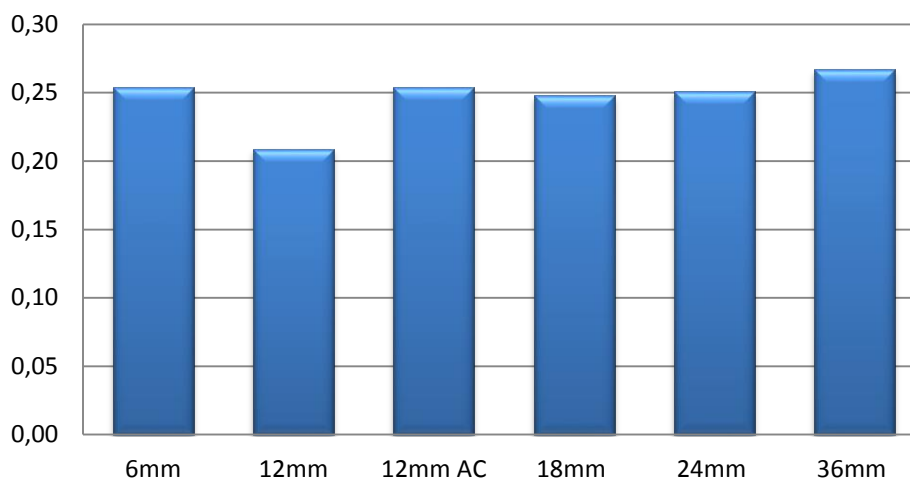


**Figura 76** Izquierda muestra con fibras de 12 mm AC con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado, derecha muestra con fibras de 18 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado.



**Figura 77** Izquierda muestra con fibras de 24 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado, derecha muestra con fibras de 36 mm con 2% de fv en su dosificación y curada con tratamiento acelerado.

### Resistencia con 2% y tratamiento acelerado



**Gráfica 2** Resistencia a la carga de las muestras curadas tratamiento con 2% de fv en su dosificación.

#### 4.5 Comparación fibras de vidrio, acero y sintéticas.

En este apartado se hará una comparación entre las gráficas Fuerza-Deformación de los ensayos a 4 puntos realizados sobre las muestras.

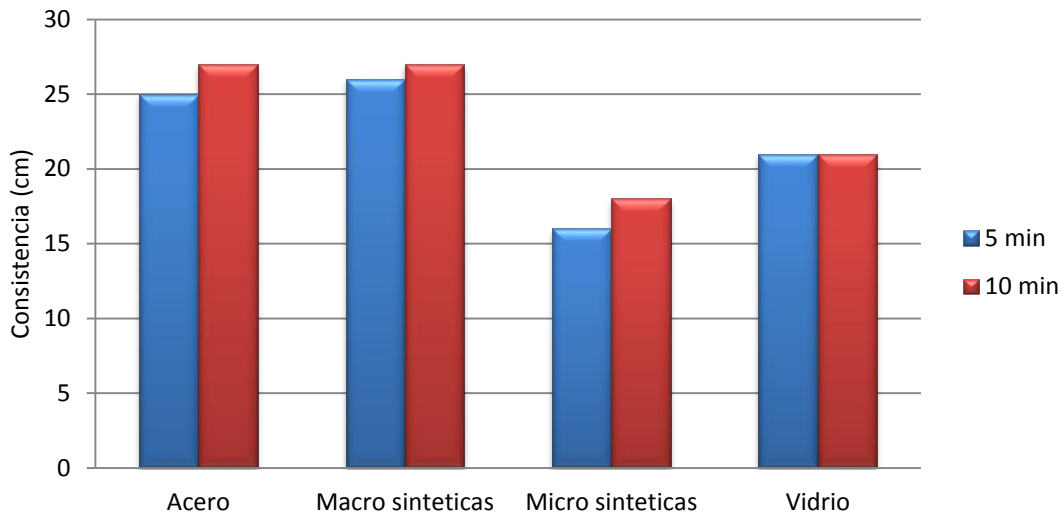
Se observara y se analizara las diferencias que existen entre los valores obtenidos por muestras con fibras de vidrio, acero y sintéticas. Las dosificaciones serán las presentadas en la tabla 2.

**Tabla 14** La dosificación se expresa en por ciento del volumen total.

| Fibras       | Vidrio | Acero | Macro sintéticas | Micro sintéticas |
|--------------|--------|-------|------------------|------------------|
| Dosificación | 1%     | 1%    | 1%               | 0,5%             |
|              | 2%     | 2%    | 2%               | N/A              |

La dosificación en las fibras de vidrio, acero y macro sintéticas se mantiene constante debido a que con esta dosificaciones se mantiene la consistencia deseada para que la pasta se autocompactable, hay un cambio en las micro sintéticas ya que estas tienen un gran efecto en la trabajabilidad de la mezcla y se ha tenido que reducir la dosificación.

## Fibras vs Consistencia



**Figura 78** Consistencia a diferentes tiempos de fraguado.

Como se observa en la figura 78 las fibras de vidrio eran las que tenían una desviación menor a los diferentes tiempos de mezclado y su variación en la consistencia.

### 4.5.1 Consistencia y Tiempo de mezclado.

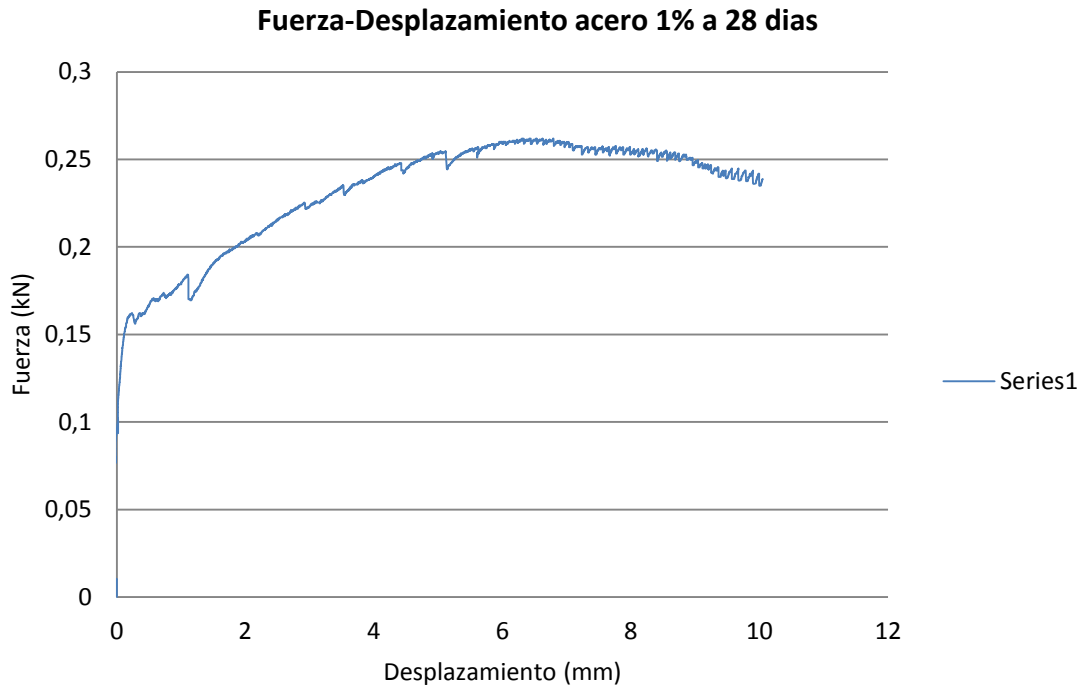
Como en el análisis de las fibras de vidrio para la producción de la pasta también se analizó la consistencia y el tiempo de fraguado, en la siguiente tabla se muestra los valores obtenidos.

**Tabla 15** Consistencia y dosificación en las muestras.

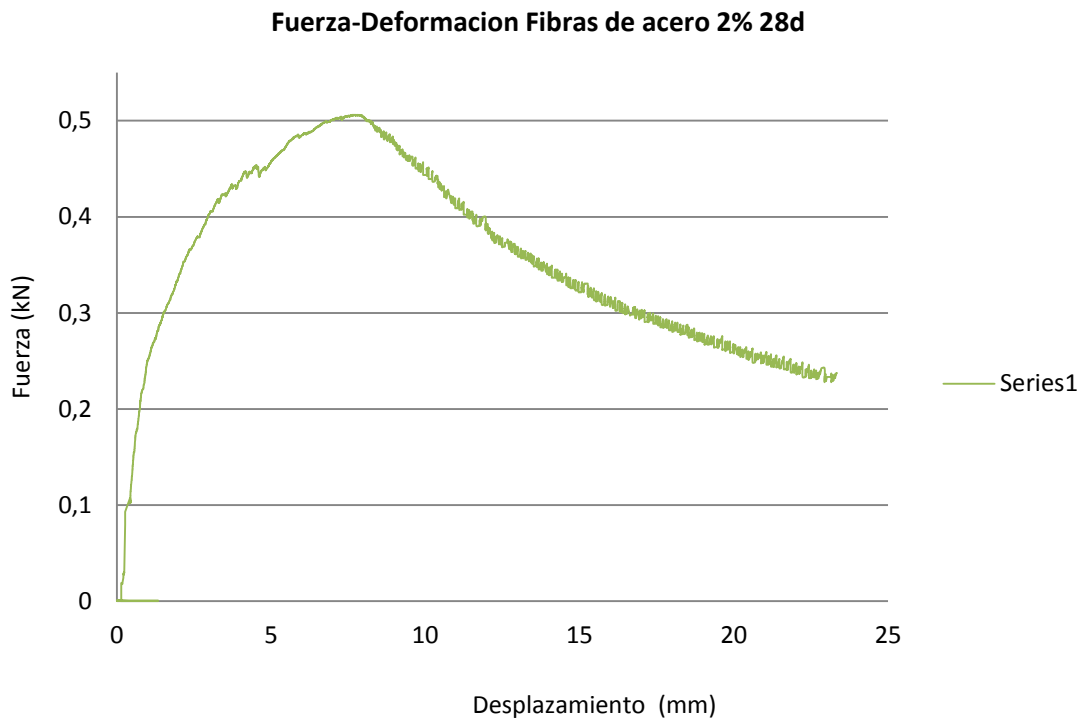
| Consistencia (cm) |                 |                         |                         |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| Dosificación      | Fibras de Acero | Fibras Macro sintéticas | Fibras Micro sintéticas |
| 1%                | 26              | 27                      | 16                      |
| 2%                | 27              | 27                      | N/A                     |

### 4.5.2 Ensayos de resistencia a flexo traccion fibras de acero y sintéticas.

Se mostraran las gráficas Fuerza-Deformación de las muestras con Fibras de acero y Fibras sintéticas.



**Figura 79** Muestra con fibras de acero ensayadas a 28d con 1% de  $f_v$  en su dosificación.



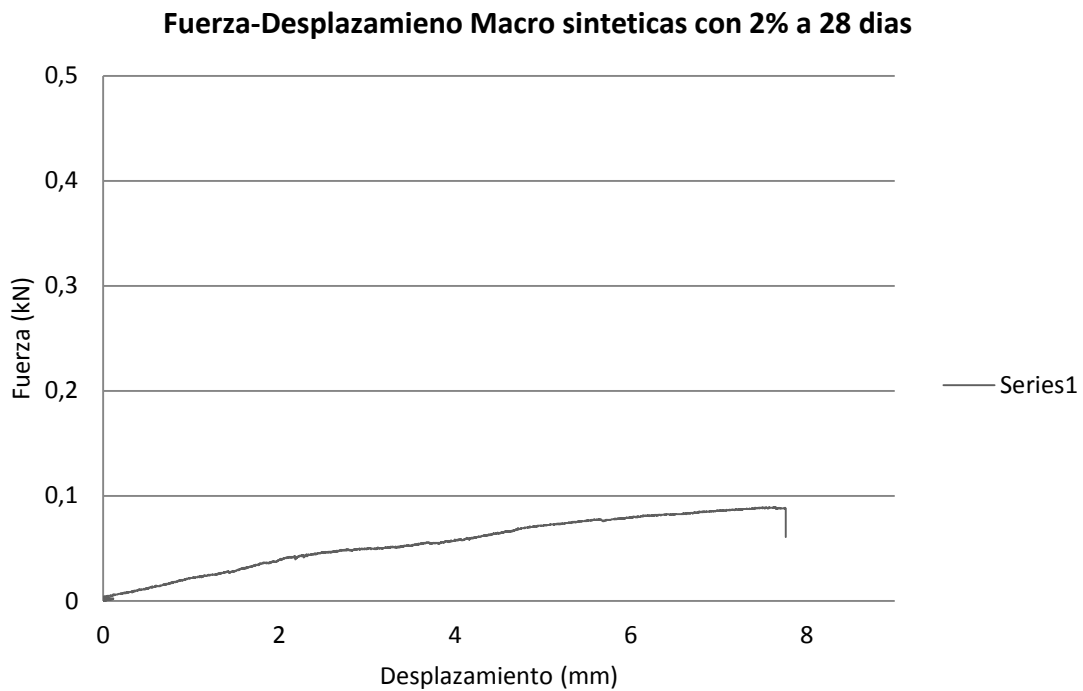
**Figura 80** Muestra con fibras de acero ensayadas a 28d con 2% de  $f_v$  en su dosificación.

Como se puede apreciar en las figuras 79 y 80 las muestras con fibras de acero mejoran en todos los aspectos la muestra control otorgándole más capacidad de carga y más ductilidad al material UHPC. En la figura 79 la capacidad de carga mejora en un 137% con relación a la capacidad de carga de la muestra control.

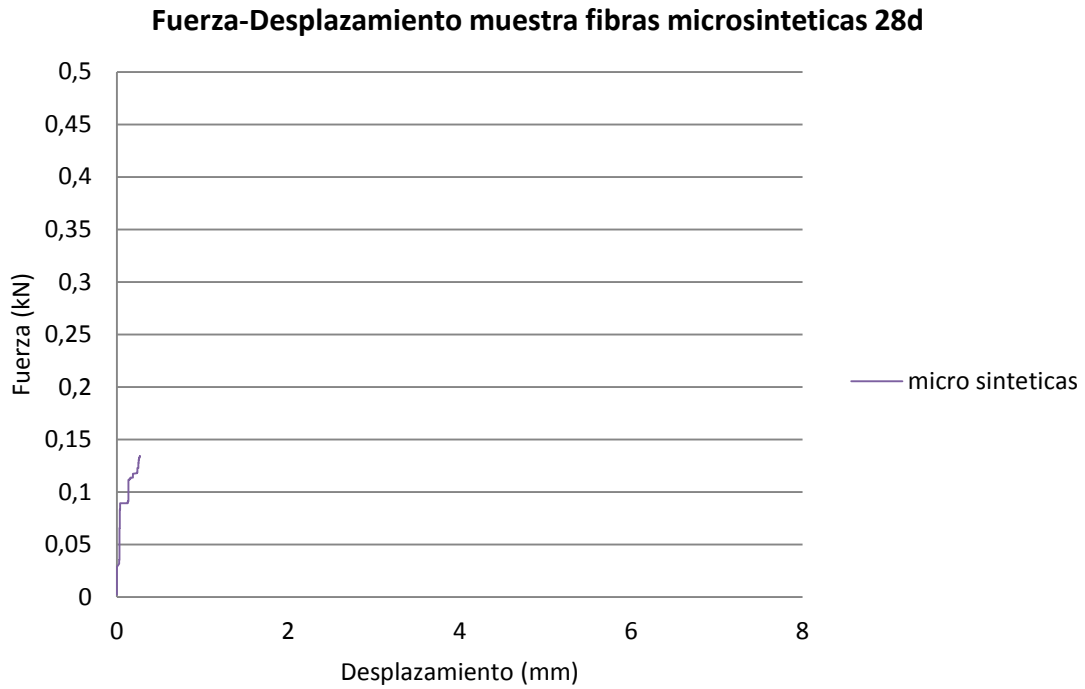


En la figura 80 se duplica el contenido de fibras de acero lo cual como se observa sigue mejorando las características del material llevando la capacidad de carga de un 137% con 1% de dosificación a un 332.47% de mejora lo que nos indica que la capacidad se ha incrementado en un 195.48% casi duplicando las propiedades de la muestra con un 1%.

En las siguientes graficas se observara y analizara como nos afecta la incorporación de macro y micro fibras sintéticas a la muestra control.



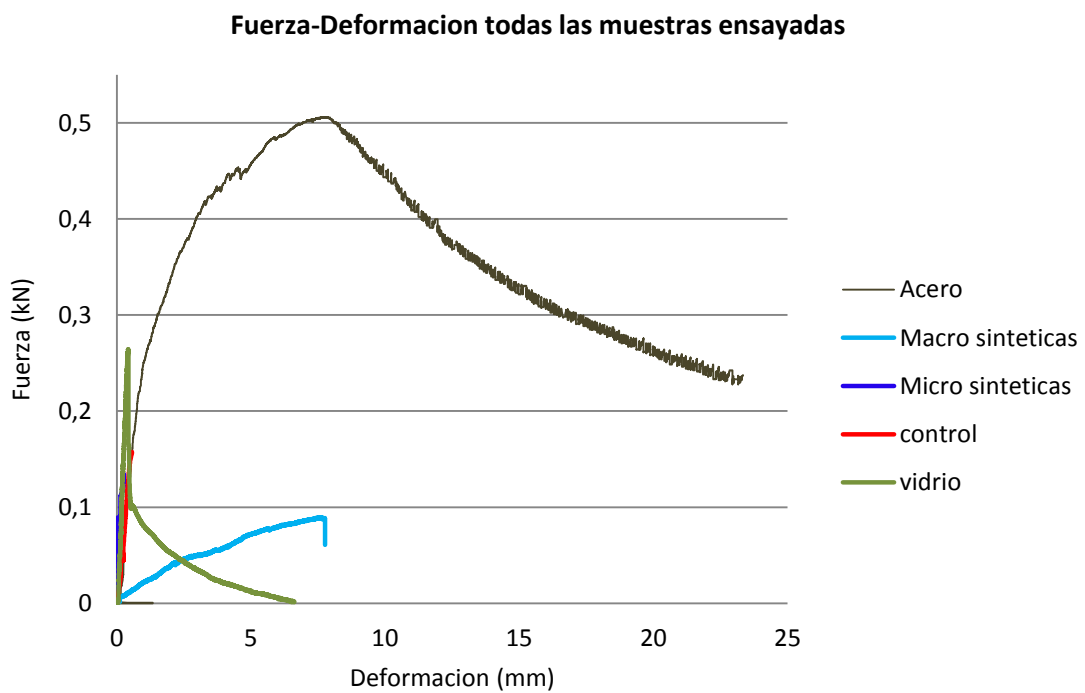
**Figura 81** Muestra con fibras Macro sintéticas ensayadas a 28d con 2% de  $f_v$  en su dosificación.



**Figura 82** Muestra con fibras Micro sintéticas ensayadas a 28d con 0,5% de  $f_v$  en su dosificación.

Como se puede observar las fibras sintéticas no soportan mucha carga y la ductilidad es muy baja.

En la figura 83 se mostrara las gráficas de la muestra control y las gráficas de las fibras de vidrio, acero y sintéticas.



**Figura 83** Muestra con todas las fibras ensayadas a 28d.

#### 4.6 Ductilidad de las fibras.

En este apartado se presentan los valores de las fibras que aumentaban la ductilidad en el UHPC y como esta ductilidad variaba según el tiempo. En la figura 84 se muestra la ductilidad de muestras curadas a 28 días con 1%.

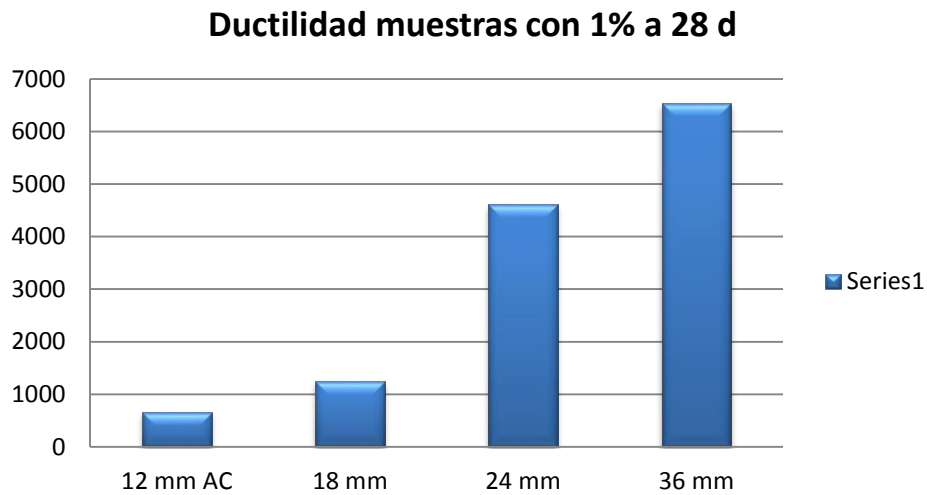


Figura 84 Ductilidad muestras curadas a 28 días con 1% de contenido.

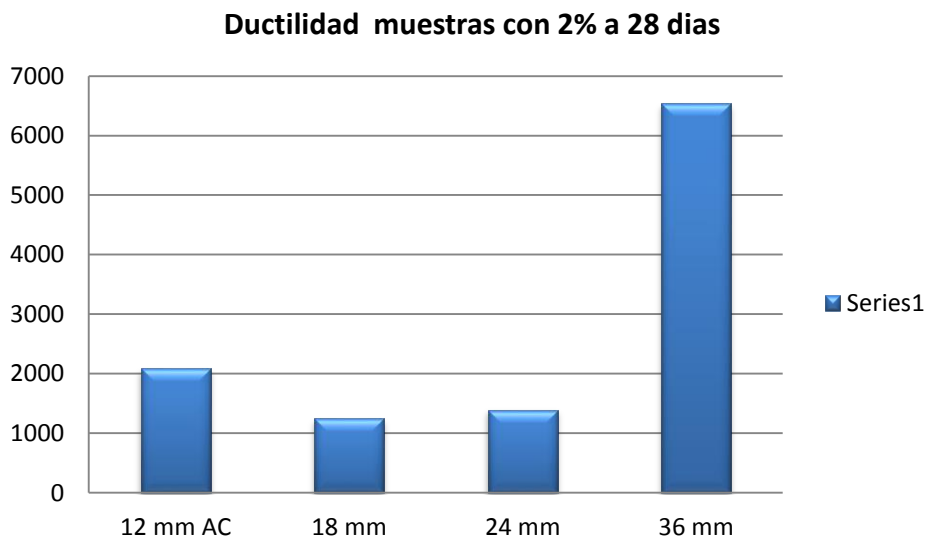
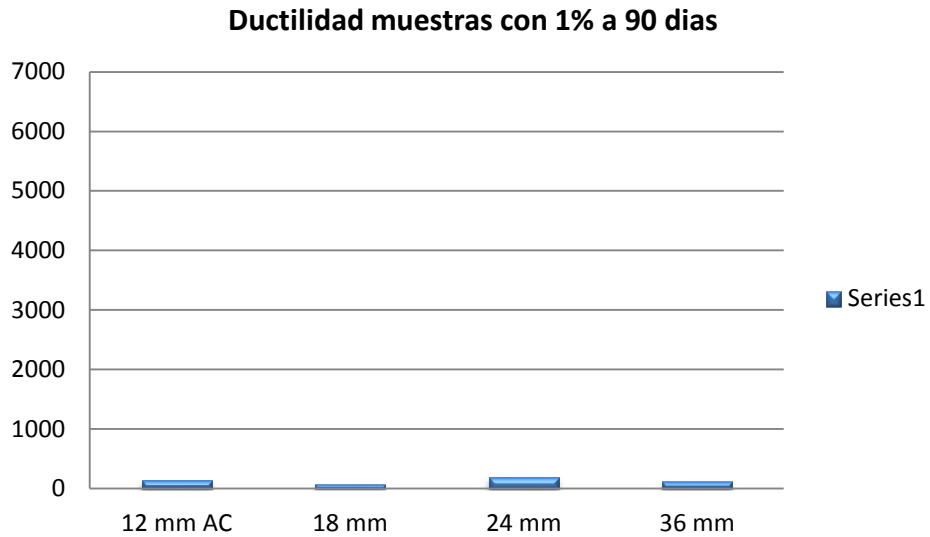


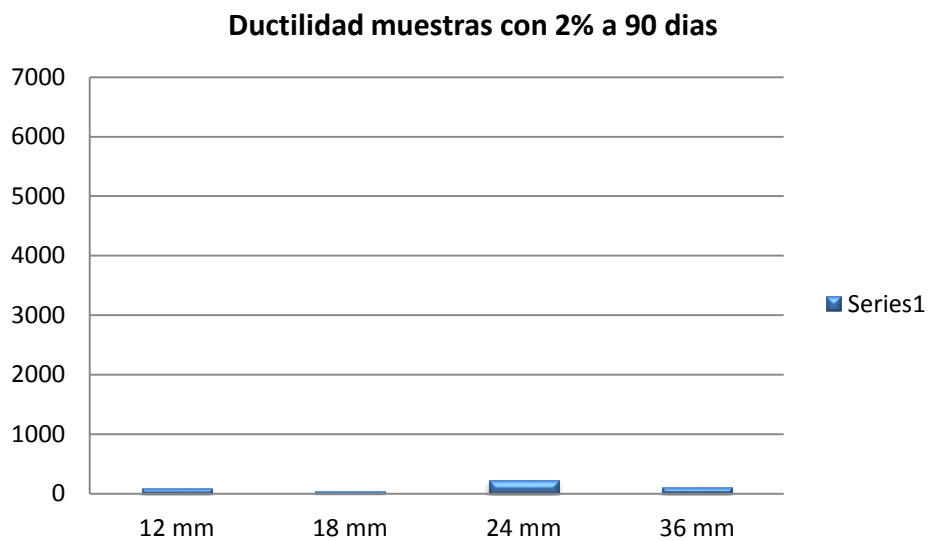
Figura 85 Ductilidad muestras curadas a 28 días con 2% de contenido.

En la figura 85 se muestran los valores de ductilidad con un aumento del contenido de un 1% a un 2%. La relación sigue igual a mayor tamaño de fibra más ductilidad se obtiene.



**Figura 86** Ductilidad muestras curadas a 90 días con 1% de contenido.

Como se puede observar (figura 86) la ductilidad de las muestras curadas a 90 días se ve muy reducida con relación a las curadas a los 28 días.



**Figura 87** Ductilidad muestras curadas a 90 días con 2% de contenido.

### Ductilidad fibras con tratamiento acelerado.

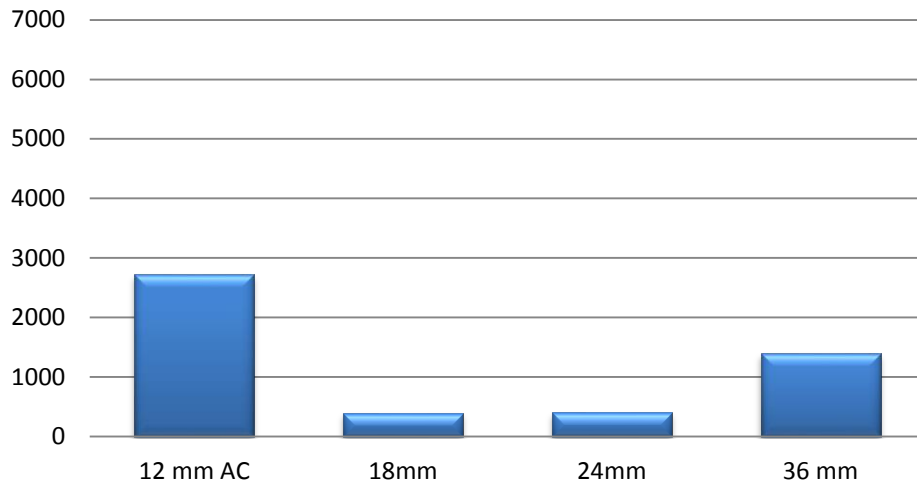


Figura 88 Ductilidad muestras curadas con tratamiento de envejecimiento acelerado.

Como se puede observar la ductilidad reduce con relación a las curadas a 28 días pero aún mantiene más ductilidad que las curadas a 90 días. Cabe destacar que la fibra de 12 mm AC es la que mejor ductilidad presenta, pudiendo ser debido al tratamiento que tiene la fibra que hace que los filamentos se mantengan unidos.

### Ductilidad de las fibras a diferentes edades, contenidos y curado.

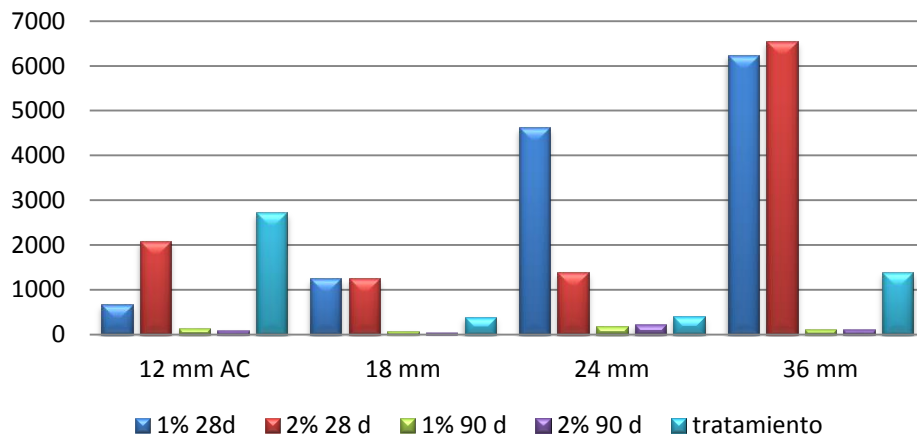
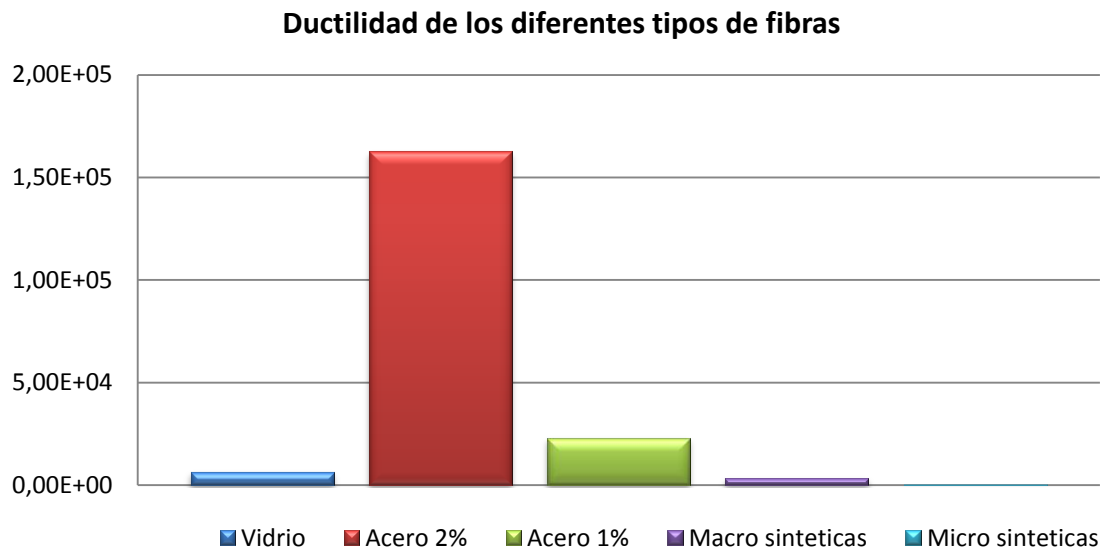


Figura 89 Ductilidad de las muestras curadas a diferentes edades, contenidos y con diferentes curada.

En la figura 89 se puede ver que las muestras con 2% de contenido y curadas a 28 días son la que presentan mejor ductilidad proporcionan a la mezcla de UHPC.

La figura 90 muestra la ductilidad de cada uno de los tipos de fibras que se analizaron y como se puede observar la que mayor ductilidad proporciona son las de acero y

luego las de vidrio, al contrario de las sintéticas que no proporcionan mucha ductilidad al UHPC.



**Figura 90** Comparación de la ductilidad de todos los tipos de fibras utilizadas.

## Capitulo V. Conclusiones y líneas de investigación.

---

En el siguiente apartado se mostrara de forma esquemática y enumerada las conclusiones que obtuvimos y que se han deducido de los ensayos y los experimentos realizados. Las conclusiones estarán divididas en varios bloques, primero se mostrara los efectos de la incorporación de las fibras en el UHPC, los efectos en la reología de la mezcla, las diferencias entre las diferentes muestras experimentadas y ver su comportamiento a largo y corto plazo y por último se desarrollaran las conclusiones comparando las fibras y cuál de ellas causa mejor efecto en el UHPC.

#### **Efectos de las muestras con la incorporación de las fibras de vidrio.**

- I. Todas las muestras incorporadas con fibras muestran un grado mayor en la resistencia a la carga y en la ductilidad. Las fibras cortas (6mm y 12mm) solo aumentan la resistencia del UHPC pero no aporta a la ductilidad por lo que el comportamiento es frágil. Las fibras de 12 mm AC, 18 mm, 24 mm y 36 mm aumentan la resistencia a la carga y la ductilidad de las muestras.
- II. De las fibras cortas la que mayor resistencia a la carga presenta es la de 6 mm que a pesar de su comportamiento frágil aporta una gran aumento en la resistencia a la carga llegando a elevarse en más de un 200% en comparación con la muestra control, de las muestras curadas a 28 días comparadas con las curadas a 90 días se nota un aumento en la resistencia a la carga pero una reducción en la ductilidad por lo que se estima que las fibras se han ido desagrado con el tiempo.

#### **Consistencia y tiempo de mezclado.**

- I. La muestra control mostraba un mini-cono de Abrams de 23-25 cm con lo que se obtenía un hormigón autocompactable, cuando se le incorporaba las fibras la consistencia se reducía de modo considerable haciendo la mezcla menos trabajable. Las fibras cortas eran las que presentaban una reducción en la consistencia llegando a reducir el cono en un 50% con relación al control. A medida que las fibras aumentaban de tamaño la consistencia aumentaba llegando a obtener el cono óptimo de 21 cm en las fibras de 12 mm AC, 18 mm y 24 mm. Por otra parte las fibras de 36 mm seguían dando una consistencia más fluida llegando a tener una media de 23.5 cm. Por lo que se determinó que las fibras de mayor tamaño eran mejores para mantener la consistencia de la pasta.
- II. Se analizaron dos tiempos de mezclado que fueron 5 min y 10 min de donde se observó que en todas las mezclas que el tiempo de mezclado fue de 10 min, la consistencia aumentaba un poco, pero no se veía una gran diferencia en



relación a las que duraban 5 min. Por lo que se puede tomar una media de 7.5 min para obtener un tiempo optimo como tiempo de mezclado de la pasta.

#### **Comparación entre fibras de acero, vidrio y sintéticas.**

- I. El mejor de los casos es la muestra que contiene fibras de acero esta alcanza un nivel muy superior. Por otra parte se puede observar que las fibras de vidrio aportan una considerable mejoría en la resistencia a la carga y a la ductilidad, la que mayor efecto produce en relación a la resistencia a la carga y a la ductilidad es la muestra con fibras de 36 mm esta tiene una zona de descarga muy bien definida. Esta ductilidad no se mantiene a lo largo del tiempo ya que las muestras curadas a 90 días perdían ductilidad.
- II. Las fibras Sintéticas muestran poca mejoría tanto a resistencia como a ductilidad. Las fibras micro sintéticas aumentan un poco la resistencia pero no aportan a la ductilidad la cual sigue siendo frágil. Las fibras Macro sintéticas aumentan considerablemente la ductilidad de la mezcla pero no causan efectos positivos en la resistencia.
- III. Las Fibras de acero son las que mejores características presenta ya que aumenta la resistencia mecánica y la ductilidad.

#### **5.1 Futuras líneas de trabajo**

Se proponen nuevas líneas de investigación centradas en los epígrafes siguientes:

- I. Profundizar en formas estructurales aplicadas con más conciencia a las propiedades de este material, sobre todo para elementos de cubierta, placas finas y fachadas.
- II. Elaborar ensayos a tamaño real en laboratorio con el objetivo de analizar el comportamiento real de los elementos prefabricados.
- III. Experimental y crear ensayos mezclando varios tipos de fibras con el cual se busca como objetivo obtener la mejoría de la resistencia mecánica y la mejora de la ductilidad.
- IV. Estudiar con mayor profundidad el deterioro de las fibras de vidrio en diferentes tipos de ambientes.

# Bibliografía

- ACI Committee 318. (2011). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11)*. Estados Unidos de América.
- Ahlbron, T. S. (2012). *Proceedings of the 3<sup>o</sup> International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high performance construction materials*.
- Arramjos, L. (s.f.). Manual para uso de fibras de vidrio. *Arramjos em Fibras*.
- Camacho Torregrosa, E. E. (2013). *Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties*. Valencia.
- Cemento Esfera. (junio de 2014). Recuperado el 2 de junio de 2014, de Lafarge: [www.lafarge.com.es/ficha de seguridad C.ESFERA.rtf.pdf](http://www.lafarge.com.es/ficha%20de%20seguridad%20C.ESFERA.rtf.pdf)
- Efraím, C. T. (2010). *Caracterización de hormigones e muy alta resistencia con fibras*. Valencia.
- Elkem Silicon Materials, Products and Markets. (2012). Recuperado el 14 de julio de 2014, de Elkem Silicon Materials, Products and Markets: <https://www.elkem.com/en/Silicon-materials/Search/?quicksearchquery=940+U>
- Fehling, E. (2004). *Design relevant properties of hardened Ultra High Performance Concrete*. . Kassel.
- García, M. R. (2013). *Diseño estructural y dimensionamiento de elementos prefabricados de hormigon de muy alta resistencia reforzados con fibras para el levantamiento de una nave industrial en el poligono industrial de Alcira*. Valencia.
- Gobierno de España. (Julio de 2008). Instrucción de hormigon estructural (EHE-08). *Instrucción de hormigon estructural (EHE-08)*. Madrid, España.

- Interim Recommendations. (2012). *Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes*. Paris.
- López Martínez, J. Á. (2011). *Diseño estructural de un muro de contención de tierras para la defensa de taludes en el puerto de Javea (Alicante) con la utilización de hormigón de muy alto rendimiento*. Valencia.
- López Martínez, J. Á. (2012). *Adaptación del modelo de comportamiento del ultra high performance concrete (UHPC) para el estudio de la respuesta y análisis numérico de una celosía*. Valencia.
- Mármol Salazar, P. (2010). *Hormigones con fibras de acero características mecánicas*. Madrid.
- Martinie, L. R. (2010). *Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction*. Cement and Concrete Research 40.
- Morales Ortuño, S. A. (2008). *Fibras de vidrio, pruebas y aplicaciones*. México.
- OCV Reinforcements*. (diciembre de 2012). Recuperado el 14 de julio de 2014, de OCV Reinforcements: <http://www.ocvreinforcements.com/cemfil/ab-product-brands.aspx?lg=es&>
- Parra-Montesinos, G. R. (2012). *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 6*. New York: RILEM .
- Sika*. (s.f.). Recuperado el 14 de julio de 2014, de Sika: <http://esp.sika.com/es/group.html>
- Spasojevic, A. (2006). *Possibilities of Innovation in Bridge Design*. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, IS-Beton.