

Trabajo de Investigación CST/MIH-16

CARACTERIZACIÓN DE HORMIGÓN CON FIBRAS SINTÉTICAS RECICLADAS

Por:

Itziar Carné García

Junio 2016.

Autor / Author: Itziar Carné García		Fecha / Date: Julio 2016	
Título / Title Caracterización de hormigón con Fibras sintéticas recicladas.			
Directores del trabajo / Supervisores: Pedro Serna Ros		Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 93
Departamento / Departament: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA			
			
 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA			
Palabras clave / Keywords: Retracción, Retracción plástica, Comportamiento mecánico, hormigón, fibras recicladas.			
Código Unesco: 3305/05 Ciencias tecnológicas / Tecnología de la construcción / Tecnología del Hormigón			

AGRADECIMIENTOS

A Pedro, por confiar en mí desde el primer momento, por demostrarme que siempre se puede mirar más alto, por devolverme el entusiasmo que había perdido por una carrera que me encanta, por enseñarme el poder de la comunicación con el hormigón. Gracias por los almuerzos y por enseñarnos que hay que estar dónde no nos llaman.

A Marta Roig por tantas cosas que si empiezo no acabo, por encontrar las cosas que nadie encuentra, por las traducciones de idiomas que nadie entiende, porque nunca dice que no, porque ha sido un apoyo fundamental y porque si en mi mano estuviera tendrías mucho más que un simple gracias.

A Guillermo, por las risas, porque dime tú quien iba a pedir bien los almuerzos si no estuvieras.

A mis dos técnicos favoritos por ser los perfectos “Poli bueno y poli malo”

A Jürgen por poner un poco de orden, por la paciencia, por confiar en mis ideas de bricolaje para principiantes, por la sabiduría y los trabajos de precisión con nuestras herramientas de alta tecnología.

A Paco Martorell, por las risas, por el Rock, por tus ideas de bombero, las que funcionan y las que no, por los ánimos cuando parecía que todo salía mal, por tus acabados profesionales en las probetas. Por poner la fuerza bruta y por tus “ponte los guantes” y “¡anda quita! que te vas a hacer daño”.

A Roger Fos Soler por enseñarme las maravillas de Arduino y hacer que me quiera hacer una experta en “robots”.

A Roxana Rodríguez porque 4 manos hacen más que 2, y los días en la instron son interminables.

A mis 2 hermanas, el Ying y el Yang, que siempre estáis ahí.

A mi madre por enseñarme a luchar por lo que quiero.

A mi teleco favorito, porque de tanto escucharme te van a acabar convalidando la carrera, por todo lo que ya sabes y porque sí. Gracias.

CONTENIDO

1	Resumen	1
2	Introducción.....	3
2.1	Fibras sintéticas recicladas.....	4
3	Objetivos.....	7
4	Estado del arte.....	9
4.1	Fibras en el hormigón.....	9
4.1.1	Comportamiento mecánico.....	11
4.1.2	Fibras sintéticas	13
4.2	Aplicación de productos reciclados.....	14
4.3	Retracción del hormigón	16
4.3.1	Factores que influyen en la retracción	18
4.3.2	Fisuración por retracción.....	19
4.3.3	Métodos para el control de la retracción.....	20
4.3.4	Estudio y evaluación de la retracción	23
5	Programa experimental y metodología.....	31
5.1	Programa experimental	31
5.1.1	Planteamiento del programa de trabajo.....	34
5.2	Materiales a utilizar	34
5.2.1	Cemento	34
5.2.2	Agua	34
5.2.3	Áridos	35
5.2.4	Fluidificante	35
5.2.5	Fibras.....	36
5.3	Metodología.....	37
5.3.1	Ensayos a realizar.....	37
5.4	Puesta en Marcha del ensayo de retracción plástica.....	45
5.4.1	Pruebas de funcionamiento.....	47
5.4.2	Conclusiones sobre el método.....	50
5.5	Puesta en marcha del ensayo de retracción mediante anillo restringido	52

5.5.1	Conclusiones sobre el método.....	54
6	Resultados y Análisis	55
6.1	Efecto de las fibras sobre el hormigón.....	55
6.1.1	Ensayos de control para las amasadas de caracterización mecánica.	55
6.1.2	Ensayos de control para las amasadas de retracción.....	57
6.1.3	Conclusiones	58
6.2	Caracterización mecánica	59
6.2.1	Resultados de flexotracción de acuerdo a la norma UNE EN 14651	59
6.2.2	Resultados de flexotracción de acuerdo a la norma ASTM C 1609.....	61
6.2.3	Resultados de ensayo de placa (Round Panel ASTM C 1550).....	62
6.2.4	Conclusiones	63
6.3	Evaluación de retracción.....	64
6.3.1	Retracción plástica.....	64
6.3.2	Anillo restringido	67
6.3.3	Retracción libre.....	69
6.3.4	Conclusiones	70
7	Conclusiones y futuras líneas de investigación.....	71
7.1	Conclusiones	71
7.2	Futuras líneas de investigación	72
	Referencias.....	73
	Anejos.....	79
7.3	Datos individuales de los ensayos de compresión y Flexotracción.....	79
7.3.1	Caracterización mecánica	79

1 RESUMEN

Este trabajo se realiza un análisis de viabilidad del uso de fibras sintéticas recicladas procedentes de sacas fuera de uso para la fabricación de hormigón.

La viabilidad de la aplicación propuesta se analizará por medio de la caracterización del hormigón con fibras basada en una serie de ensayos que den luz sobre las expectativas de los hormigones fabricados con este tipo de fibras en comparación con las propiedades obtenidas con otras fibras que actualmente se encuentran en el mercado. La geometría que presentan las fibras es variable encontrando tamaños desde los 10 mm hasta los 40 mm, con una mayor presencia de fibras de alrededor de 12-15 mm. Por lo que la hipótesis de partida es que pueden funcionar de forma similar a las fibras comerciales para control de retracción, que tienen tamaños de unos 12 mm y diámetros de unos 30 μm .

Por tanto, se planteará una campaña de ensayos de retracción que permita verificar si las fibras sintéticas recicladas se pueden utilizar como fibras para control de retracción en hormigón.

Dada la presencia de fibras de mayor tamaño, se planteará de manera secundaria una campaña de ensayos de caracterización mecánica que indiquen si estas fibras tienen influencia sobre el comportamiento post-fisuración del hormigón.

De los estudios se deducirá la posibilidad de aplicación en uno u otro tipo de aplicación, y, sobre todo, se llegará a un planteamiento de dosificación del hormigón con fibras sintéticas recicladas para conseguir propiedades similares a las exigidas en casos reales de hormigones con fibras.

2 INTRODUCCIÓN

El uso de materiales reciclados se está haciendo cada vez más extenso en el ámbito de la construcción. El elevado volumen de materias primas utilizado para la fabricación de productos de construcción ha hecho que se plantee la utilización de materiales fuera de uso para la fabricación de nuevos materiales de construcción. Así se fomenta una construcción sostenible, reduciendo el impacto ambiental.

Dado el creciente uso de fibras para reforzar el hormigón, se hace necesaria la incorporación de materiales reciclados que las sustituyan o que sean de utilidad para la fabricación de nuevos tipos de fibras que den la posibilidad de conseguir comportamientos, si no iguales, sí similares a los de las fibras comerciales no recicladas.

La motivación de este trabajo es el estudio de la viabilidad de la utilización de fibras sintéticas recicladas procedentes de residuos como sacas fuera de uso, cubiertas de invernaderos agrícolas, etc. Este tipo de productos se utilizan para el transporte de otros productos y en actuaciones agropecuarias, y supone un gran volumen de material que va directamente a vertedero. Están fabricados con un tejido de fibras sintéticas de polipropileno, material con el que se fabrican algunas fibras comerciales para el hormigón. Esto presenta una ventaja frente a las fibras fabricadas a partir de PET que presentan problemas de durabilidad a causa del carácter alcalino del hormigón. Para caracterizar estos hormigones, se analizan ensayos en estado fresco y endurecido.

Las FSR se caracterizan por tener una distribución de tamaños continua. Por el contrario, las fibras sintéticas comerciales utilizadas suelen adaptar sus dimensiones a la aplicación concreta. Así, si se emplean con fines estructurales, suelen ser de mayor tamaño y, las utilizadas para el control de la fisuración por retracción, de menor longitud y diámetro. Por ello se plantea su posible uso para la FSR que combine tanto el aspecto mecánico como el de control de la fisuración por retracción.

Una de las posibles aplicaciones de estas fibras es el de control de la fisuración por retracción del hormigón. En la actualidad, uno de los métodos más utilizados para

controlar la fisuración por retracción es la inclusión de fibras en la masa de hormigón que se reparten homogéneamente. Estas fibras son de unos 31 μ m diámetro y 12 mm de longitud de forma que permiten incluir un gran número de fibras por m³ de hormigón. El efecto que producen sobre el hormigón es el de impedir el libre movimiento de agua hacia la superficie, que es uno de los principales motivos por los que se produce la retracción.

El fenómeno de la retracción provoca fisuras en el hormigón que afectan a la durabilidad de las estructuras, ya que facilita la penetración de agentes agresivos que pueden dañar las armaduras y el propio hormigón. Puesto que las fibras sintéticas recicladas presentan una granulometría continua en la que existe un gran número de fibras similares a las comercialmente utilizadas para el control de la retracción, se presenta un proyecto de trabajo para caracterizar el comportamiento de estas fibras frente a este fenómeno.

A causa de la granulometría discontinua de las fibras sintéticas recicladas, otro de los aspectos a estudiar es el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con estas fibras.

Se pretende realizar una campaña de ensayos a fin de caracterizar el comportamiento del hormigón reforzado con FSR y analizar su comportamiento mecánico y frente a fisuración por retracción. Para ello se realizará una campaña de ensayos en dos fases: una primera fase de caracterización mecánica y una segunda fase de ensayos de retracción. Al analizarse dos tipos de características, se emplean como referencia hormigones con dos dosificaciones distintas acordes al uso previsto.

En caso de alcanzar un resultado favorable, se estaría presentando la posible incorporación al mercado de un producto que supondría un considerable aporte al medio ambiente, ya que los residuos plásticos suponen un importante volumen respecto del total de los residuos. Consiguiendo incorporar materiales reciclados, no sólo se le da una nueva vida a los residuos, sino que se fomenta un menor consumo de materias primas vírgenes, reduciendo el impacto ambiental que ello supone.

2.1 Fibras sintéticas recicladas

El producto que se presenta para este estudio, son fibras sintéticas obtenidas a partir del lavado y triturado de sacas de transporte fuera de uso.

El material del que están hechas es polipropileno, al igual que algunas fibras sintéticas comerciales, lo que garantiza su compatibilidad con el carácter alcalino del hormigón. Con un primer análisis visual de las fibras recicladas, se comprueba que presentan una granulometría continua, con diversidad de tamaños, como se puede ver en la Figura 1.

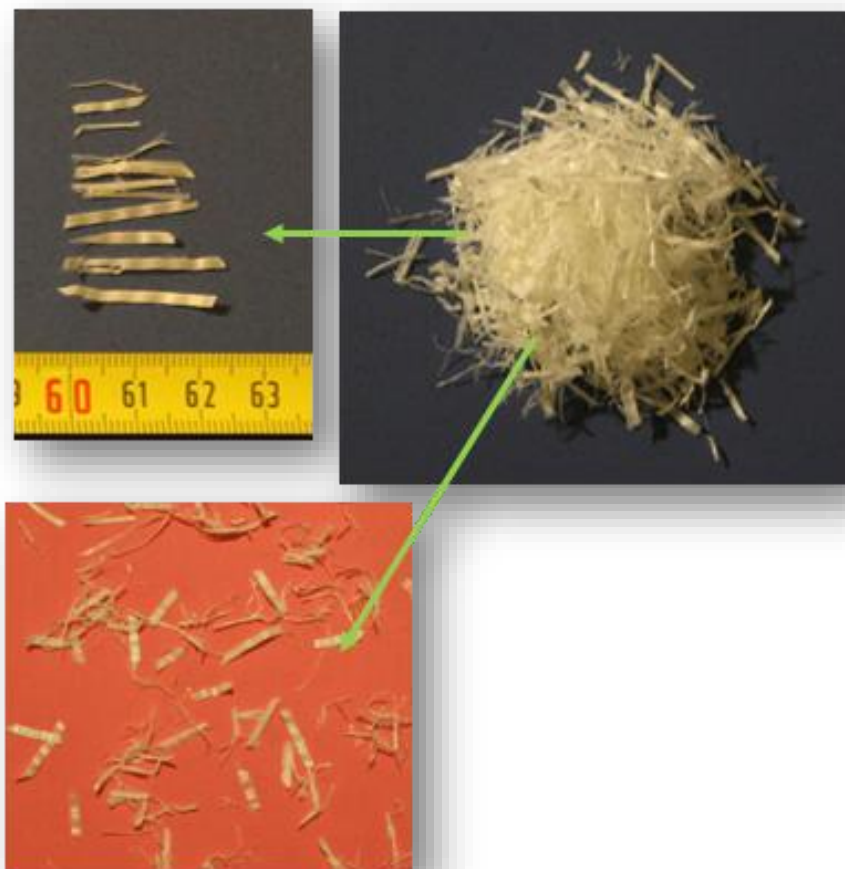


Figura 1. Fibras sintéticas recicladas procedentes de sacas fuera de uso.

En cuanto al espesor de las fibras no hay mucha variación, mientras que si tenemos en cuenta la longitud existe una gran diferencia entre unas fibras y otras.

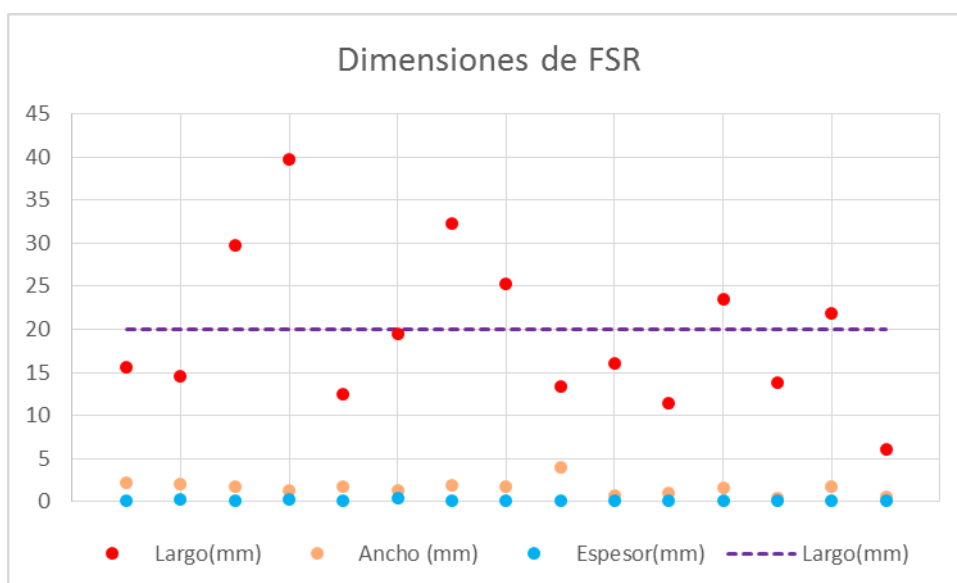


Figura 2. Distribución de dimensiones de las fibras sintéticas recicladas.

La Figura 2 muestra la distribución de dimensiones de una muestra de estas fibras. Aproximadamente un 10% de estas fibras tienen una longitud superior a 30 mm lo que, de acuerdo con la norma UNE – EN 14889-2, corresponde a macro – fibra sintética. Un 65% se sitúa entre 10 y 25 mm. Esta granulometría hace que se plantee su posible uso tanto estructural como de control de fisuración por retracción. Esta granulometría hace que se plantee su posible uso tanto estructural como de control de fisuración por retracción.

Esperándose resultados más favorables en los ensayos de retracción plástica debido al mayor número de micro fibras.

3 OBJETIVOS

El objetivo principal de este estudio es dar una aplicación a fibras sintéticas recicladas procedentes de sacas (big-bags) fuera de uso, como componente del hormigón para el control de retracción.

Para ello se plantean los siguientes objetivos principales:

- Llevar a cabo distintos ensayos de retracción a fin de caracterizar el comportamiento de los hormigones reforzados con fibras sintéticas recicladas.
- Comparar hormigones fabricados con distintos tipos de fibras para evaluar la retracción sufrida, así como la fisuración debida a este fenómeno.
- Fabricar hormigones con distintas dosificaciones de fibras sintéticas recicladas para determinar la influencia de las mismas.

Dado que las fibras recicladas son unas fibras nuevas, sin comercialización, que muestran una granulometría con diversidad de tamaños, desde los 10mm hasta los 40mm, se pretende llevar a cabo una campaña de ensayos que nos dé una idea aproximada de su efecto sobre el hormigón. Por este motivo, se plantean los siguientes objetivos secundarios, en los que se incluyen ensayos de caracterización mecánica debido a la presencia de fibras de mayor tamaño:

- Caracterizar el comportamiento mecánico de los hormigones reforzados con fibras sintéticas recicladas mediante ensayos de flexotracción y de placa circular.
- Evaluar el efecto de las fibras en la consistencia y resistencia a compresión simple del hormigón.

4 ESTADO DEL ARTE

A continuación se tratará, a través de los estudios previos disponibles, el uso de fibras en el hormigón y su uso para controlar la fisuración por retracción; el reciclado de productos y su aplicación a las fibras para el hormigón; y por último, el fenómeno de la retracción, su efecto sobre el hormigón, los métodos de control de retracción y los métodos de ensayo disponibles.

4.1 Fibras en el hormigón

El refuerzo con fibras de elementos constructivos no es un método nuevo, desde 1540 se incluyen fibras de paja o pelo de caballo, mucho más tarde, hacia el año 1900 se extendió el uso de fibrocemento, hasta que se descubrieron las consecuencias perjudiciales para la salud de las fibras de amianto que contenía. Por ello, desde los años 60 hasta hoy, se han ido introduciendo fibras alternativas al sector de la construcción [1].

La inclusión de fibras en el hormigón es un método que se sigue utilizando hoy en día para mejorar propiedades del hormigón, como la durabilidad, módulo elástico, control de retracción, resistencia a fuego, resistencia a flexión, etc.

La función de las fibras consiste fundamentalmente en mantener unidas las fisuras que aparecen en el hormigón y evitar su propagación. Las fibras más pequeñas ayudan a que no se propaguen las pequeñas fisuras, mientras que las fibras más grandes mantienen unidas las fisuras de mayor tamaño aportando resistencias residuales tras la rotura del elemento, como se puede ver en la Figura 3.

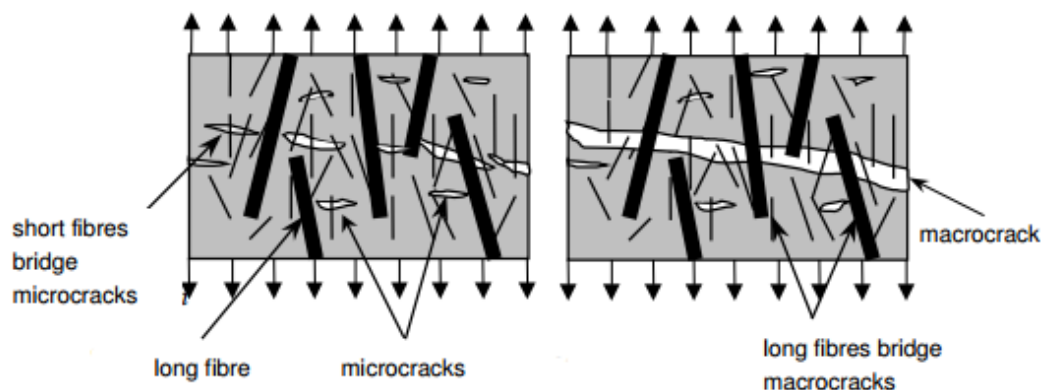


Figura 3. Efecto de las fibras sobre las fisuras [2].

En la actualidad existen muchos tipos de fibras en el mercado, de origen natural (carbón, celulosa...), sintéticas (nylon, polipropileno...) o metálicas.

En la Tabla 1 se citan algunos tipos de fibras y sus características:

Tabla 1. Tipos de fibras y características – marcados en rojo los tipos de fibra utilizados en este estudio.

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

Las fibras se pueden clasificar según su comportamiento en fibras estructurales y no estructurales, las primeras se pueden tener en cuenta en los cálculos de la sección mientras que las segundas se utilizan para mejorar algunas propiedades del hormigón sin tenerlas en cuenta en los cálculos. También se pueden clasificar según su naturaleza como fibras de acero, poliméricas, de vidrio, etc.



Figura 4. Clasificación de las fibras para hormigón.

4.1.1 Comportamiento mecánico

Los hormigones reforzados con fibras presentan una mayor deformación frente a los hormigones sin refuerzo, de manera que, cuando se alcanza la carga de rotura, comienzan a trabajar las fibras que, generalmente, tienen buena resistencia a tracción, y ayudan a que no se propague la fisura en el hormigón.

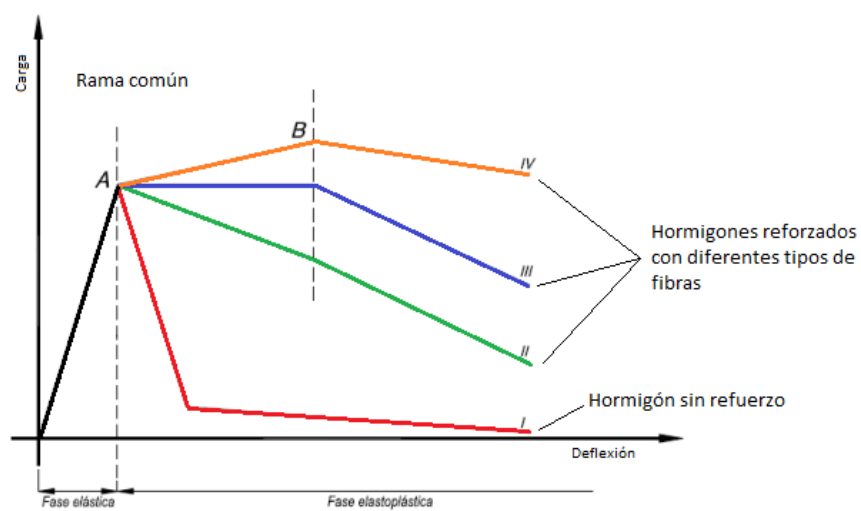


Figura 5. Efecto de las fibras sobre el comportamiento del hormigón.

La geometría de las fibras también tiene un peso importante en el comportamiento del hormigón. Existen fibras lisas, dobladas, laminadas, trefiladas, etc.



Figura 6. Posibles geometrías para fibras metálicas [1] – se señalan las geometrías utilizadas en este estudio.

Se debe tener en cuenta este factor dependiendo del uso que se le vaya a dar al hormigón, puesto que una fibra lisa mostrará menos adherencia que una fibra doblada o rugosa.

Esto lleva a un factor importante; el comportamiento de las fibras cuando se alcanza la rotura de la pieza de hormigón. Una fibra doblada en los extremos no se comportará igual que una fibra recta. Si la fibra no tiene un buen comportamiento a tracción, se quebrará bruscamente reduciendo significativamente la absorción de energía. Esto se comprende mejor observando las gráficas de la Figura 7

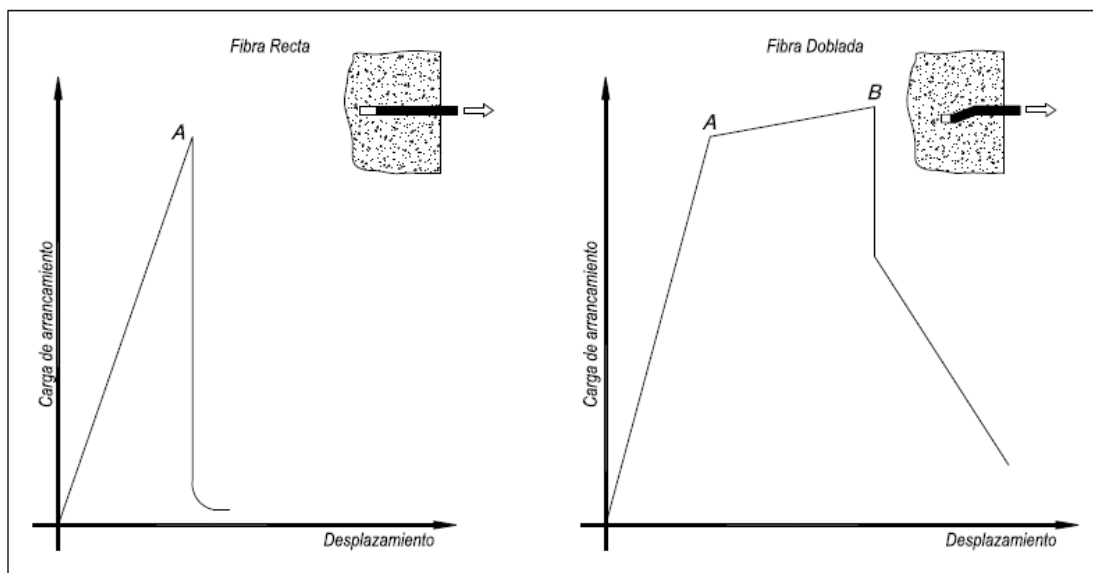


Figura 7. Influencia de la geometría de las fibras [3].

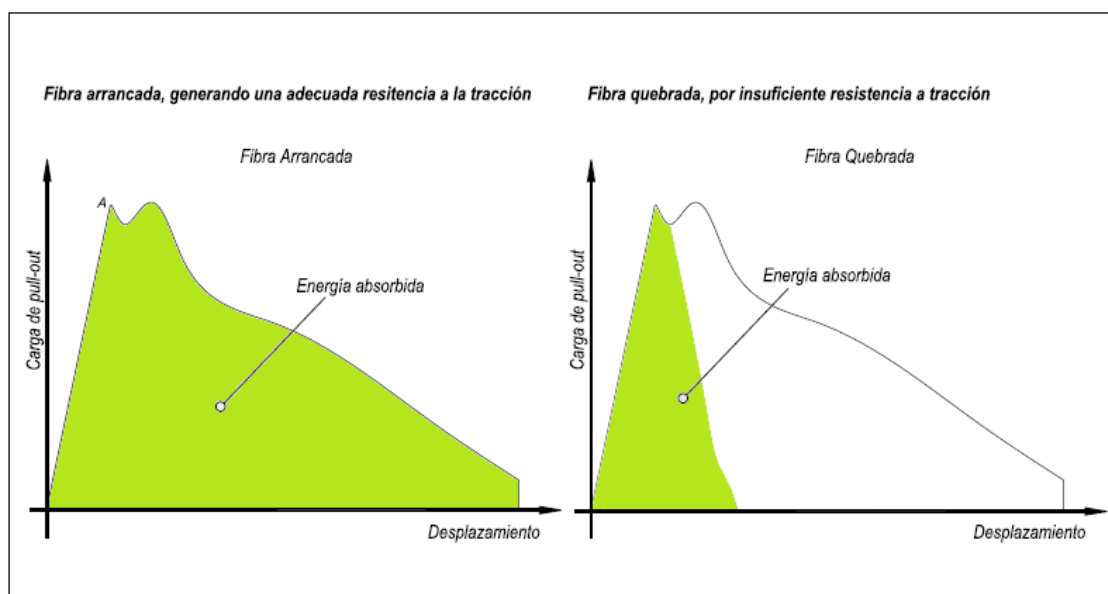


Figura 8. Influencia de la resistencia a tracción de las fibras sobre la energía absorbida [3].

4.1.2 Fibras sintéticas

Las fibras sintéticas, al contrario que las metálicas, no sufren los daños ocasionados por la corrosión. Pueden ser de materiales como el polipropileno, nylon, alcohol de polivinilo, entre otros, y se ha de comprobar su compatibilidad con el hormigón. Estas fibras están sujetas a la norma UNE – EN 14889 – 2 donde se establecen los criterios de clasificación y de conformidad. Según esta norma se consideran como macro fibras, las que tienen diámetros ≥ 0.3 mm mientras que las micro fibras, utilizadas para el control de retracción plástica, son de diámetros < 0.3 mm y longitudes alrededor de los 12 mm. Las fibras destinadas al control de la retracción plástica se caracterizan por tener un gran número de fibras/kg. Las FSR que se analizan en este estudio poseen una granulometría continua conteniendo fibras que se podrían clasificar en las dos categorías, es por esto que se plantea un programa de ensayos que incluya tanto caracterización mecánica como de control de fisuración por retracción.

4.1.2.1 Macro – fibras sintéticas

Aunque la norma establece para estas fibras tamaños > 0.3 mm de diámetro y 30 mm de longitud, las macro fibras sintéticas comerciales suelen tener diámetros cercanos a 1mm y longitudes alrededor de los 40 – 50 mm (Figura 9). Se utilizan en el hormigón con carácter estructural, para que se consideren así, deben cumplir los requisitos marcados por la >EHE en su anejo 14. Art. 31.4 en el que se establece que para que una fibra se considere con carácter estructural la resistencia residual $fr1 \geq 0.4 \cdot LOP$ y $fr3 \geq 0.2 \cdot LOP$



Figura 9. Aspecto de macrofibras sintéticas comerciales.

4.1.2.2 Micro - fibras sintéticas

Estas fibras se caracterizan por tener una cantidad de fibras por kg aproximadamente $2 \cdot 10^3$ veces mayor que las macrofibras sintéticas, sin embargo carecen de carácter estructural. Este tipo de fibras, denominadas también monofilamento, actúan reteniendo en la masa de hormigón tanto los sólidos, como el agua, de forma que evitan que gran parte del agua se eleve a la superficie libre de hormigón y se evapore rápidamente, dando lugar a la retracción y, en consecuencia, a la fisuración del hormigón.

Otra de las aplicaciones de este tipo de fibras es la de aumentar la resistencia al fuego, al tener un gran número de fibras por kg, estas se distribuyen por toda la masa de hormigón, de forma que, a altas temperaturas, la fibra desaparece, proporcionando una red capilar a través de la cual se evapora fácilmente el agua evitando el estallido del hormigón.



Figura 10. Aspecto de microfibras sintéticas comerciales.

4.2 Aplicación de productos reciclados

La producción mundial de plásticos en 2014 fue de 311 millones de toneladas, de las cuales alrededor de 60 correspondían a Europa, siendo el segundo mayor productor

de plásticos, de estas últimas, 25.8 toneladas se convirtieron en residuo, y aunque la mayoría se recicló o se aprovechó como material energético, casi un tercio de los residuos plásticos fueron a parar a vertedero (En España más del 50% de los residuos plásticos van a parar a vertedero). Esto supone más de 8 millones de toneladas de plásticos en toda Europa, el equivalente a 800 veces la torre Eiffel. De acuerdo con el informe de Plastics Europe [4], con esa cantidad de plásticos se podrían ahorrar 8 mil millones de euros, esto hace que la importancia del reciclado no sólo tenga una importancia medioambiental, sino también económica ya que la demanda de materias primas es cada vez mayor.

Una de las posibles aplicaciones del reciclado de plásticos es el uso como fibras para hormigón, existen varios autores que han trabajado en esta línea utilizando fibras recicladas de polipropileno o polietileno tereftalato (PET) [5] [6] [7].

Este estudio se centra en el estudio de fibras recicladas de polipropileno ya que gran cantidad de fibras sintéticas para hormigón están hechas de este material, motivo por el cual cobra sentido la utilización de residuos de este plástico para producir nuevas fibras.

El polipropileno supone el 19.2% del total de plásticos siendo el plástico más demandado, es por ello que pensar en su reciclado y reutilización cobra especial importancia para el medio ambiente ya que se reduciría considerablemente el volumen de residuos plásticos generados.

4.3 Retracción del hormigón

La retracción del hormigón es un cambio de volumen tridimensional en el hormigón que puede provocar fisuras en el mismo si no se produce de forma libre. Éste fenómeno es más acusado en estructuras tipo losa dónde el espesor es mucho menor a las otras dos dimensiones.

Aunque el fenómeno de la retracción no produce daños estructurales en los elementos de hormigón, su control es importante desde el punto de vista de la durabilidad ya que, las fisuras provocadas facilitan la penetración de agentes agresivos que pueden dañar las armaduras. Para controlar estas fisuras existen en el mercado distintos métodos como son el uso de aditivos químicos reductores de retracción o fibras para el control de retracción.

Existen varios tipos de retracción en las diferentes fases del hormigón. El esquema de la Figura 11 muestra los distintos tipos de retracción a lo largo de las distintas fases del hormigón, desde su fabricación hasta su endurecimiento.

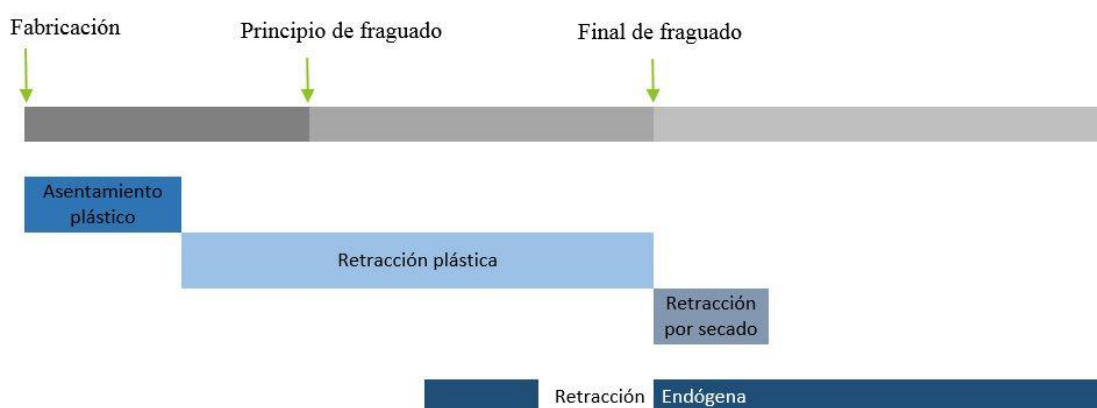
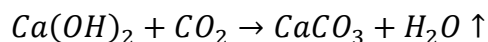


Figura 11. Tipos de retracción durante las distintas fases del hormigón.

Endógena: La retracción endógena no depende del estado del hormigón, sino de sus reacciones internas, por lo que se produce durante varios momentos del proceso de endurecimiento del hormigón. Da lugar a una disminución de volumen sin intercambio de agua con el exterior, dado que el volumen de los reactivos que intervienen en las reacciones internas es mayor que el volumen de los productos.

Por carbonatación: Se debe a las reacciones de la pasta hidratada con el ambiente, liberando agua que se pierde por evaporación.

El CO₂ libre en la atmósfera se introduce por los poros de la masa de hormigón, provocando reacciones internas:



Ecuación 1 Reacciones internas de la pasta de hormigón.

El agua que se forma se pierde dando lugar a la retracción por carbonatación, mucho menor que la endógena.

Plástica: El hormigón está sujeto a este tipo de retracción durante la fase plástica y el endurecido. Es debida a la pérdida de agua por evaporación provocada por el gradiente de humedades que se crea entre el exterior y el interior de la masa. En esta fase es dónde debe tener lugar el curado para evitar al máximo este tipo de retracción.

De secado: Se produce después del curado. Se debe a la evaporación de agua libre. La pérdida de agua capilar provoca tensiones internas.

En este tipo de retracción influye el tamaño de los huecos, por lo que también influye el tamaño de los áridos empleados en la fabricación del hormigón y el ajuste de la curva granulométrica.

Térmica: Por enfriamiento, los aumentos de temperatura y su posterior enfriamiento provocan una disminución de volumen en el hormigón. Se puede deber al descenso de temperatura causado por el fin de las reacciones exotérmicas, o por una exposición a altas temperaturas y un enfriamiento posterior.

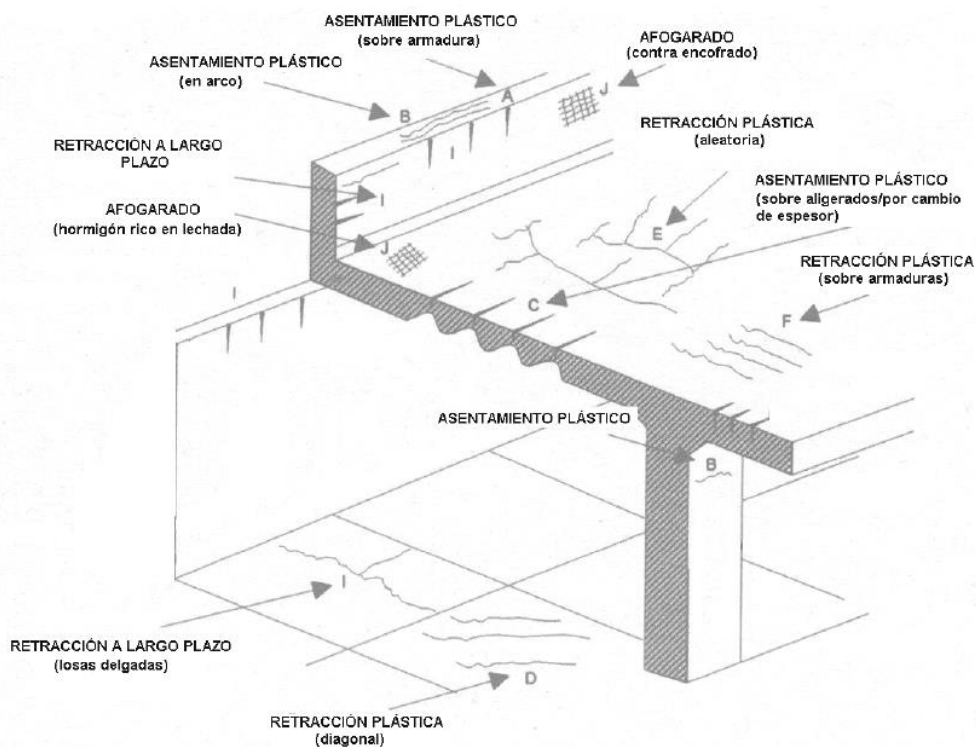


Figura 12. Tipos de fisuras por retracción y asentamiento plástico [8].

4.3.1 Factores que influyen en la retracción

En la retracción del hormigón influyen diversos factores: la relación agua/cemento, la finura de molido del cemento, el tipo de áridos, el espesor de las piezas, y la temperatura y humedad ambientales, etc.

El agua es el principal responsable de la retracción del hormigón, por ello, a mayor relación agua cemento, tiene lugar una mayor retracción. El contenido en cemento es otro de los factores a tener en cuenta para una relación A/C fija, un aumento del contenido de cemento (y por tanto de agua) se haría en detrimento del contenido de áridos, produciéndose un incremento de la retracción.

Uno de los factores más significativos que afectan a la retracción del hormigón es la edad, este fenómeno se presenta en mayor grado a edades tempranas y con mayor presencia en ambiente secos y de altas temperaturas. Realizar un curado adecuado durante las primeras horas ayuda a reducir la fisuración por retracción. Es por ello que durante los ensayos de laboratorio de evaluación de la retracción se debe tener especial cuidado en el control de la humedad y la temperatura ambientales.

Los áridos utilizados para la fabricación del hormigón padecen por sí mismos los efectos de la retracción, lo que influye en la retracción, un tamaño de árido mayor produce menor retracción. [9]

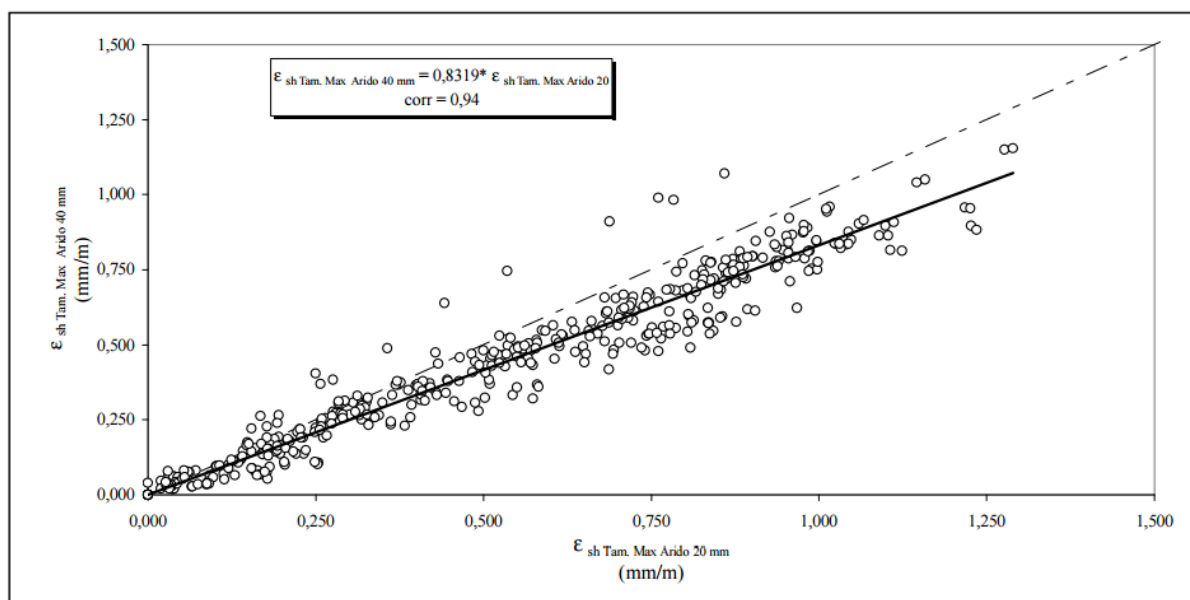


Figura 13. Efecto del tamaño de árido sobre la retracción [9].

El espesor del elemento afecta significativamente a la retracción del hormigón, los elementos de menor espesor presentan una mayor retracción, cuando el espesor del elemento es muy pequeño en comparación con sus otras dos dimensiones, tenemos mayores valores de retracción, lo que hace que el control de la misma sea de vital

importancia en elementos superficiales como losas o pavimentos. En la Figura 14 se puede ver un gráfico basado en los datos recogidos en la tabla 39.7 c de la EHE 08 [10] donde se puede ver la influencia del espesor sobre los valores de retracción. Los hormigones de menor espesor presentan un valor mayor de retracción, que los de mayor espesor. Por otra parte, los hormigones con humedades mayores presentan menores valores de retracción

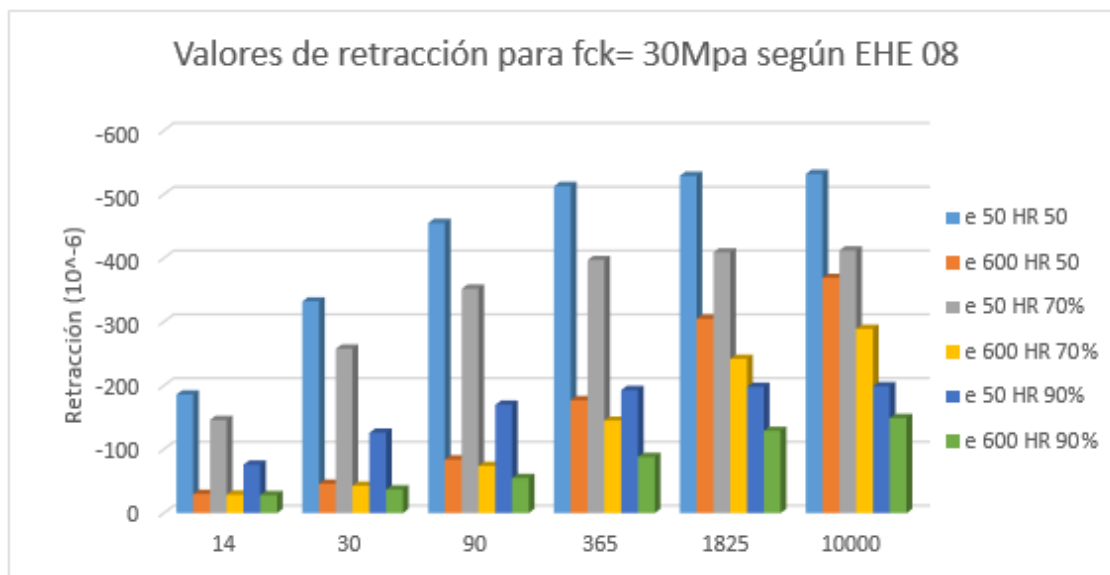


Figura 14. Influencia del espesor de las piezas y la humedad relativa en la retracción del hormigón. (Elaboración propia a partir de datos de la EHE 08).

4.3.2 Fisuración por retracción.

La fisuración del hormigón puede deberse a distintos motivos, como pueden ser la corrosión de las armaduras, que sufren una expansión en el interior del hormigón; mecanismos que generan movimientos en el interior del hormigón, como la retracción, expansiones, etc.; y por supuesto, las fisuras debidas a las cargas. La Figura 15 recoge un esquema del tiempo de aparición de los distintos tipos de fisuras.

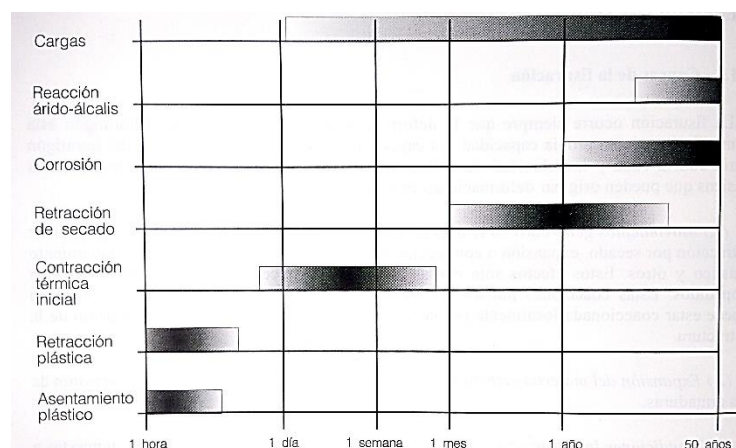


Figura 15. Aparición de fisuras a partir de la coacción del hormigón. [8].

La retracción del hormigón solamente produce fisuras cuando los movimientos están impedidos, las tracciones generadas superan la capacidad del hormigón y se generan fisuras.

4.3.3 Métodos para el control de la retracción.

La retracción del hormigón se produce a causa de los movimientos de agua en el interior de la masa de hormigón, que tiende a ascender, dando lugar al agua de exudación. El control de este fenómeno se basa, por tanto, en impedir dicho movimiento en el hormigón en estado fresco. Incluir materiales con altas absorciones que retengan el agua puede ser una medida eficaz. Algunos estudios utilizan fibras naturales, como el lino o el coco [11], que tienen una mayor absorción, el agua es retenida por estos elementos de forma que se impide su ascenso a la superficie, e incluso se contempla el uso de polímeros superabsorbentes, que funcionan como método de curado interno del hormigón [12].

Un método muy extendido en la industria de la construcción son los aditivos reductores de retracción. En todos los agentes mencionados la expansión juega un papel importante a la hora de compensar el efecto de la retracción. No obstante, en los aditivos de mayor capacidad expansiva se deberá controlar este aumento de volumen para que no produzca tensiones indeseadas. En la Figura 16 se puede ver como la adición de polímeros superabsorbentes ayuda a compensar la retracción llegando incluso a tener carácter ligeramente expansivo (deformación positiva).

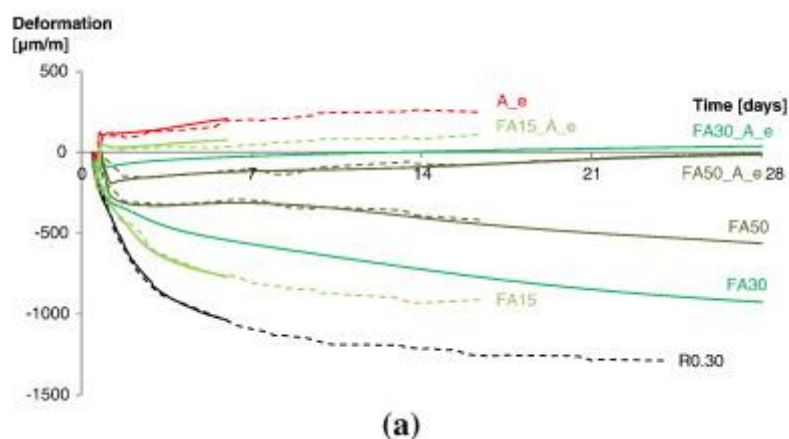


Figura 16. Efecto de polímeros superabsorbentes [13].

Los métodos más extendidos de cara a la puesta en obra son los aditivos reductores de retracción y las fibras comerciales de polipropileno. A continuación se analizan los efectos de estos métodos sobre la retracción.

4.3.3.1 Aditivos reductores de retracción

Los aditivos reductores de retracción (SRA) han demostrado ser un método eficaz para reducir la fisuración por retracción del hormigón. Pueden estar basados en glicol o en ceras como la parafina y, generalmente se presentan en estado líquido para ser añadidos en la última fase del amasado.

Este tipo de aditivos reducen el índice de evaporación en las primeras horas [14], y un aumento de la presión capilar [15] lo que indica un menor movimiento de agua desde el interior de la masa al exterior. En la Figura 17 se pueden ver los efectos de los SRA en la presión capilar, presión superficial, y retracción, dónde los hormigones fabricados con aditivos presentan mejor comportamiento que el hormigón control (C - D) en las gráficas. Tanto los aditivos basados en glicol como en ceras muestran una reducción de los mencionados factores.

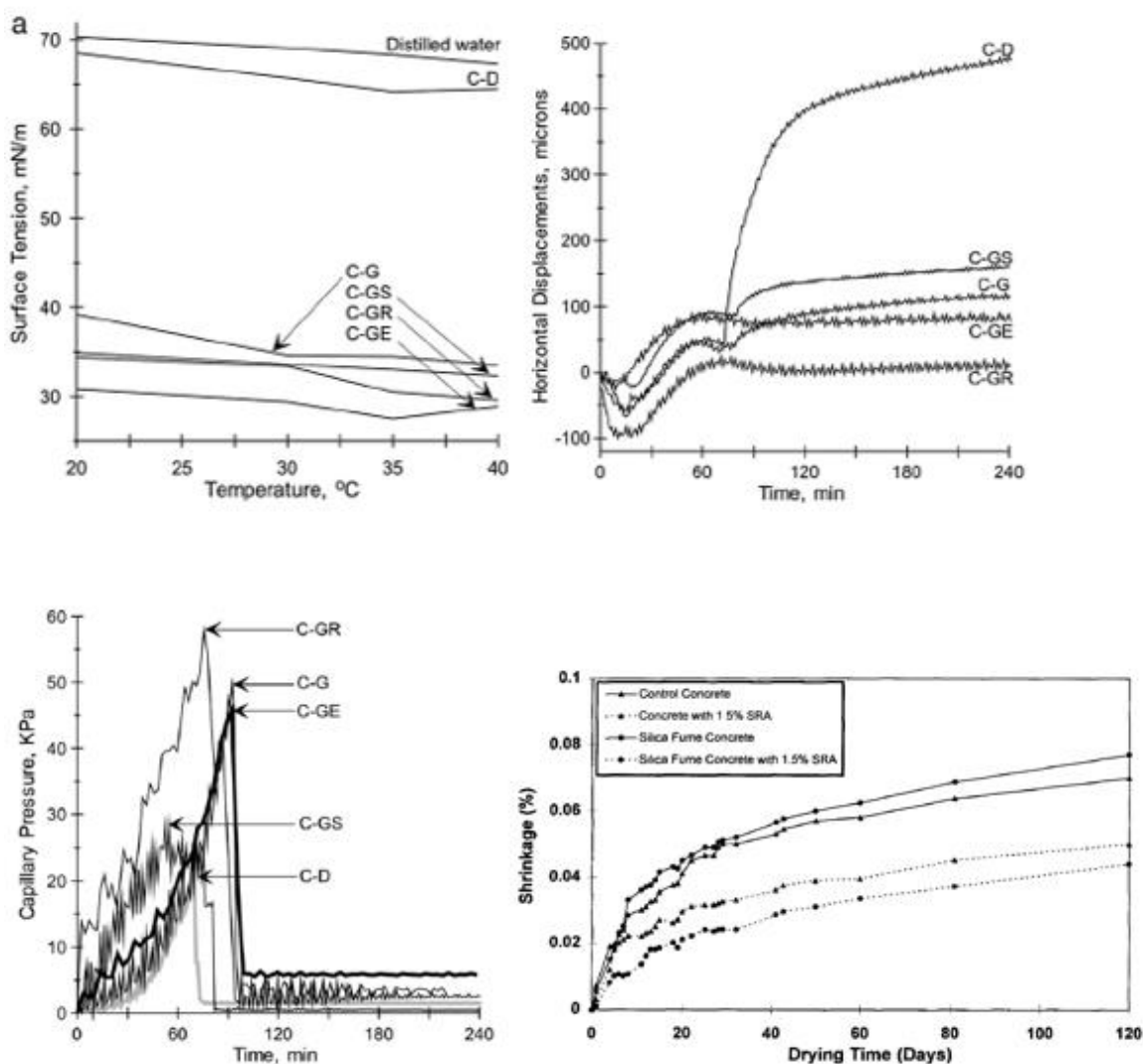


Figura 17. Tensión superficial, desplazamiento y presión capilar [15] [16].

4.3.3.2 Fibras

Las fibras para el control de retracción tienen su principal papel en la fase plástica ya que dificultan el movimiento de agua a través de masa de hormigón, reduciendo así tanto el asentamiento plástico como la retracción plástica, sin embargo, este efecto tiene menor repercusión cuando el hormigón comienza la fase de endurecimiento.

Las fibras más utilizadas para el control de la retracción son las fibras monofilamento de polipropileno, que se reparten homogéneamente por toda la masa de hormigón, estas fibras carecen de carácter estructural pero disminuyen eficazmente la retracción del hormigón. Generalmente son de pequeño tamaño, con longitudes alrededor de 12 mm y diámetros de 30 μm . Esto permite dispersar un gran número de fibras por toda la masa del hormigón a igualdad de dosificación respecto a fibras de mayores dimensiones, dificultando más eficazmente el movimiento de sólidos y líquidos. En la Figura 18 se puede ver un tipo de fibras comerciales para control de retracción.



Figura 18. Fibras comerciales para control de retracción.

4.3.4 Estudio y evaluación de la retracción

4.3.4.1 Estudio de la retracción

En 1984, Kraai [17] habla sobre la necesidad de crear nuevos métodos de ensayo, ya que el método estándar ASTM C 157, existente en ese momento, sólo evalúa los cambios de longitud. Es en 1985 cuando desarrollaría una propuesta de ensayo para la retracción por secado [18], considerada con posterioridad por numerosos autores, en la que se utilizan placas delgadas para evaluar este fenómeno.

Como se ha explicado en el apartado 4.3.2 cuando el movimiento en las piezas de hormigón está coartado es cuando aparecen fisuras, por ello, el estudio de la retracción restringida ha sido un tema que ha tenido ocupados a los investigadores. En 1989 Paillere hace uso de un tipo de probeta cuyos extremos acampanados se sujetaban para restringir el movimiento [19] de forma que la pieza se fisuraba en la parte central. En 1990 Shah y Grzybowski [20], todavía a falta de un método estándar para evaluar la retracción restringida, retoman el uso de un molde anular de acero que provoca una distribución uniaxial de tensiones. Más tarde, este método, aunque modificado, pasa a formar parte de la normativa, convirtiéndose en un modelo de ensayo estándar [21].

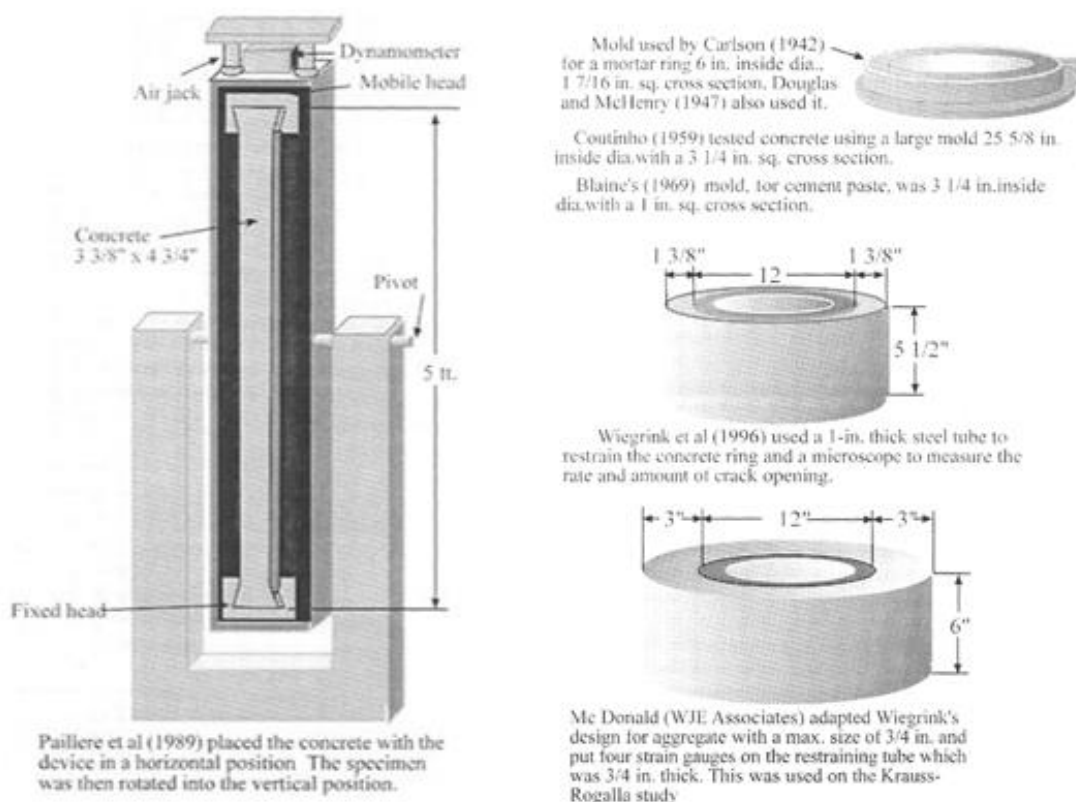


Figura 19. Probeta prismática con extremos empotrados [19]. (Izquierda) Anillo de retracción restringida (derecha) [20].

Otros métodos utilizados para analizar la retracción plástica coartan el movimiento de la masa de hormigón en los extremos de los moldes, para forzar la aparición de fisuras [22].

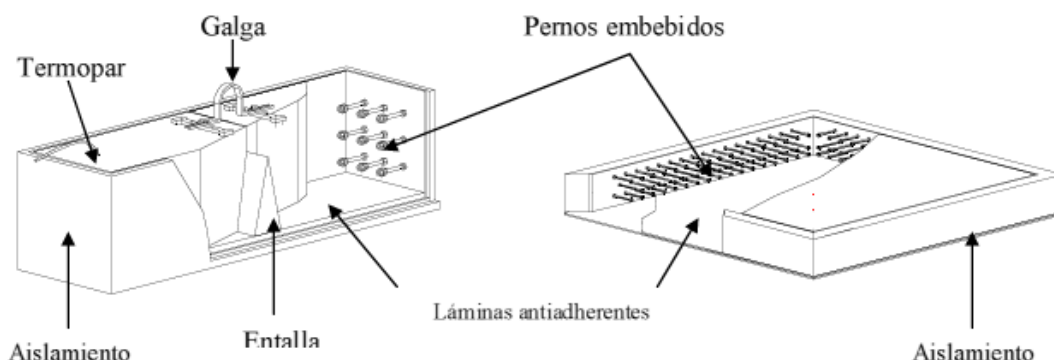


Figura 20. Moldes con coacciones en los laterales o extremos [22].

La fisuración por retracción plástica influye, sobre todo, en lugares donde la superficie es muy grande con respecto al volumen total de hormigón, por ello, se realizan ensayos que tengan en cuenta esto. Se debe tener en cuenta, que si la parte inferior de la construcción está en contacto con el suelo, el rozamiento afecta a toda la superficie. Algunas investigaciones tratan de emular este fenómeno utilizando una base fabricada en hormigón que posee protuberancias que servirán como base y proporcionarán una restricción uniforme sobre la capa de hormigón a estudiar, éste se verterá sobre las mismas, tal y como se ve en la Figura 21 y la Figura 22

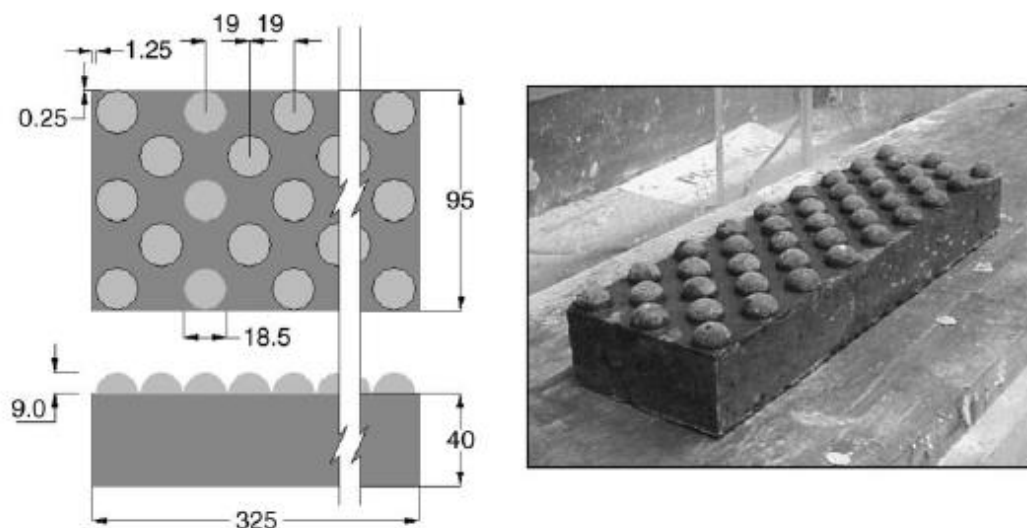


Figura 21. Base de hormigón sobre la que descansará la muestra a estudiar [11].

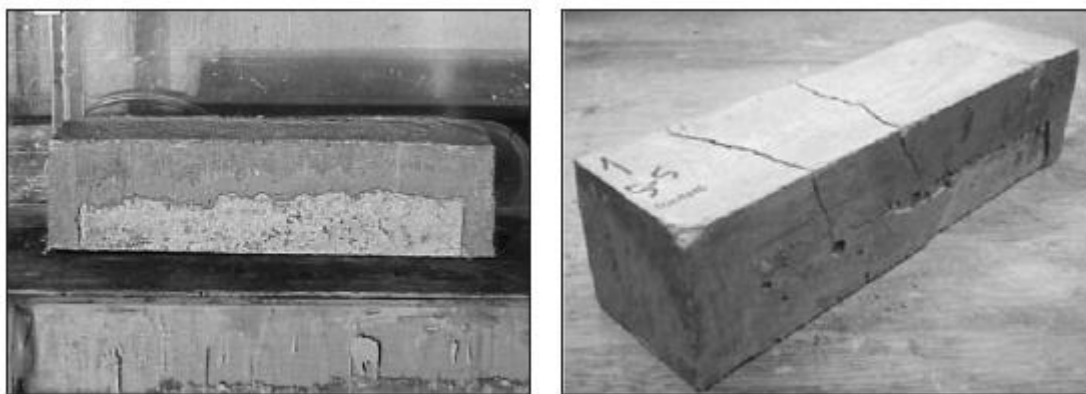


Figura 22. Pieza de hormigón durante el ensayo y tras la aparición de fisuras [11].

Este tipo de ensayo se lleva a cabo en una cámara de condiciones controladas, que emulan las condiciones a las que se encontraría el hormigón en un pavimento o similar.

En esta misma línea de ensayos se encuentra el ensayo de retracción plástica ASTM C 1579 – 06 que también utiliza coacciones en la base del molde y una cámara de condiciones controladas. Como se verá en el apartado 4.3.4.2.1

4.3.4.2 Evaluación de la retracción

El fenómeno de la retracción, puede ser evaluado de diferentes formas como determinando los cambios de longitud o las fisuras que causa. A continuación se detallan algunos métodos de evaluación de retracción.

4.3.4.2.1 Ensayos para la evaluación de la retracción.

Existen diferentes métodos para evaluar la retracción del hormigón. Fundamentalmente se basan en la medición de los cambios de longitud, la apertura de fisura o la cantidad de las mismas. Generalmente, estos ensayos van acompañados de otras mediciones complementarias, como son la medición de asiento plástico, presión capilar, temperatura y humedad entre otras.

La evaluación de la retracción se realiza por comparación con distintos tipos de hormigón, partiendo siempre de un hormigón control. De esta forma se pueden evaluar los efectos provocados por los distintos agentes añadidos al hormigón.

Los ensayos de retracción pueden llevarse a cabo permitiendo el movimiento o coartándolo. La fisuración por retracción se produce cuando el movimiento de la masa de hormigón está impedido en alguna de las direcciones, esto provoca tracciones en el hormigón que todavía no ha adquirido la resistencia suficiente para soportarlas. Puesto que la fisuración se produce cuando el movimiento está restringido, cobran especial importancia los ensayos de retracción restringida, donde se evalúan el tamaño y la cantidad de fisuras.

Ensayo de retracción libre

El ensayo más sencillo para evaluar la retracción consiste en evaluar los cambios de longitud que experimenta una muestra de hormigón sin coartar su movimiento. Para

ello se fabrican muestras prismáticas sobre moldes antideslizantes de forma que se permite el movimiento en todas direcciones. La medida de la deformación se puede tomar de diferentes formas, en la Figura 23 se ve un tipo de molde en el que quedan embebidos en la masa unos topes sobre los que se colocan captadores de desplazamiento, colocado en horizontal sobre una superficie deslizante. En este tipo de ensayos se fabrican probetas que tengan dos dimensiones de un tamaño mucho menor a las otras dos, con el fin de que la retracción en esas dos dimensiones sea despreciable.

Otro método de medición es colocar la probeta en vertical con un comparador en la parte superior de forma que se mide el acortamiento de la probeta.

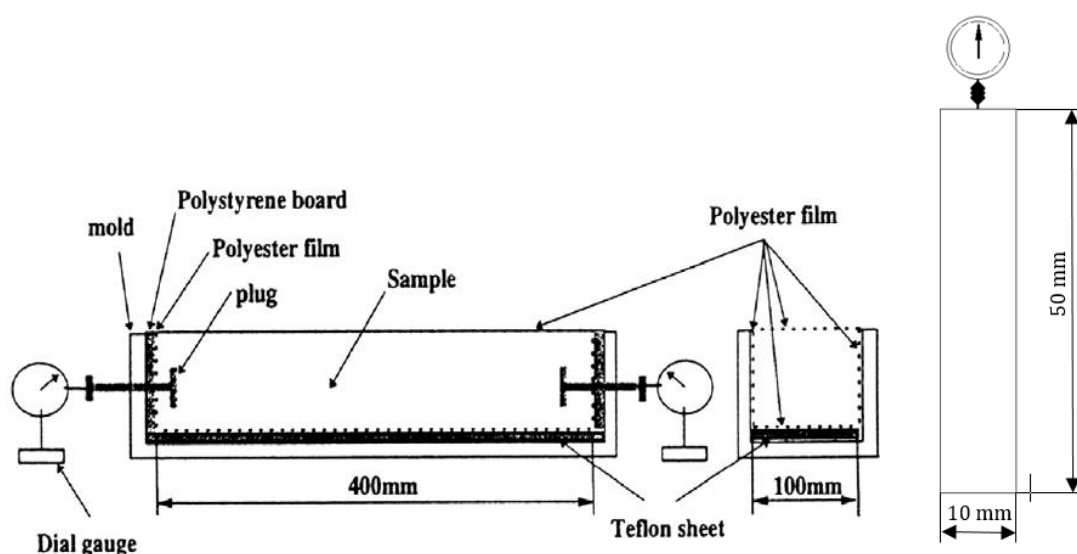


Figura 23. (Dcha.) Molde para retracción libre colocado en horizontal. - [16]. (Izda.) Probeta vertical con comparador.

Ensayo de retracción restringida

En cuanto a ensayos con coacción de movimiento, uno de los métodos que más aparece en la bibliografía desde los años 80 [17] [18] es el ensayo del anillo restringido. Este ensayo está recogido en la norma ASTM C 1581 [21] y consiste en la fabricación de un anillo de hormigón que ejercerá una fuerza sobre un anillo metálico durante su endurecimiento. Este ensayo nos da información de la presión ejercida por el hormigón sobre el anillo metálico, durante su endurecimiento, esta presión se mide mediante galgas extensométricas colocadas en el interior del anillo metálico interior. Una vez se crean la fisura, cesa esta presión, lo que se ve reflejado en la gráfica deformación-tiempo. Las fisuras que aparecen se pueden contabilizar así como la apertura de las mismas.

En la Figura 24 se puede ver la configuración del anillo de acuerdo a la norma ASTM 1581.

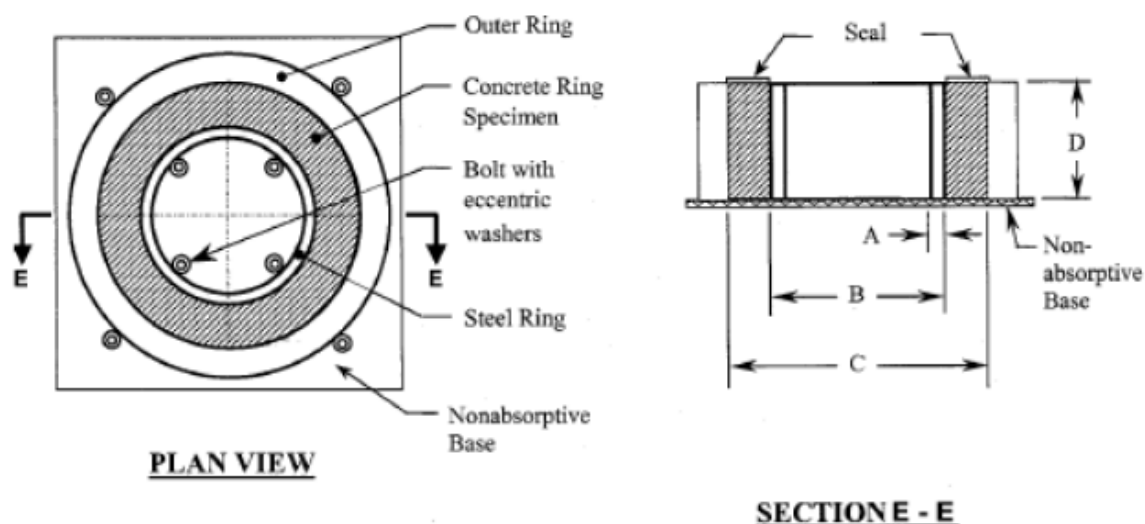


Figura 24. Anillo según la norma ASTM 1581 [21].

Ensayo de retracción plástica

Este ensayo se realiza de diferentes formas, la norma ASTM C - 1579 [23] propone un modelo de ensayo de retracción plástica, para hormigones reforzados con fibras, que consiste en verter hormigón sobre un molde con tres sobreelevaciones, dos de ellas, de menor tamaño, provocan una restricción de movimiento, mientras que una central de mayor altura provoca una sección más débil que fuerza la aparición de la fisura de forma controlada. Figura 25 (izquierda).

Otros modelos tienen la entalla central y provocan la restricción en los laterales del prisma mediante unos anclajes embebidos en la masa de hormigón. Figura 25 (derecha)

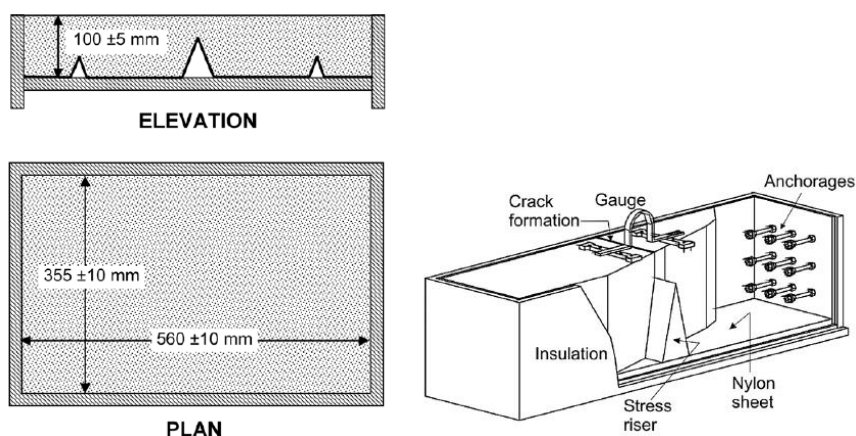


Figura 25. Molde propuesto en la norma ASTM C 1579 [23] (izquierda) molde con entalla y anclajes (derecha) [15].

La apertura de fisura se puede medir por diferentes métodos, que pueden ser el uso de galgas Figura 25 (derecha), mediciones manuales, o técnicas fotográficas.

Estos ensayos se llevan a cabo en cámaras de condiciones ambientales controladas y se coloca una báscula debajo de la probeta que indicará el índice de pérdida de masa por evaporación de agua de la muestra. Algunos autores toman medidas de presión capilar y superficial [15].

Ensayo de retracción por secado

La retracción por secado se suele evaluar mediante placas de pequeño espesor. En algunos casos se genera un flujo de viento que incide sobre las probetas de hormigón y favorece el secado teniéndose controladas en todo momento las condiciones ambientales.

Al final del ensayo se toman medidas de la localización y apertura de las fisuras.



Figura 26. Configuración de ensayo de retracción por secado [24].

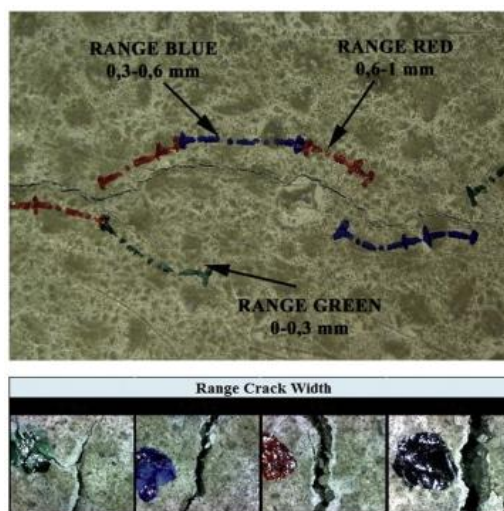


Figura 27. Evaluación de la magnitud de las fisuras tras el ensayo [24].

Ensayo de retracción autógena

La retracción autógena del hormigón es la generada por las reacciones internas del hormigón, este tipo de retracción, se da durante varios estados del hormigón.

La norma ASTM C 1698-09 propone un modelo de ensayo, para este tipo de retracción, en el que se utilizan unos moldes corrugados de polipropileno de baja densidad y poca resistencia al desplazamiento longitudinal. Estos elementos se rellenan de la pasta del hormigón a estudiar, se colocan unos captadores de desplazamiento en los extremos y se sellan. Para evaluar correctamente la retracción autógena se toman medidas continuas de estos desplazamientos.

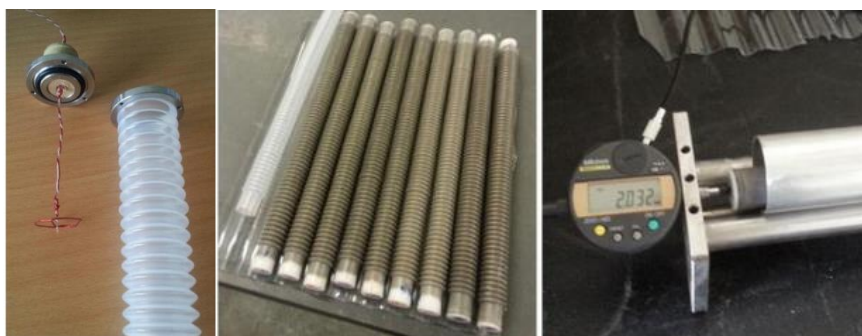


Figura 28. Instrumentos utilizados para la medición de la retracción autógena [12].

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA.

De acuerdo con lo estudiado, se puede decir que la fisuración por retracción, aunque no provoca daños graves por sí misma, es un problema a tratar para evitar las consecuencias que pueden traer este tipo de fisuras. Por ello, en este estudio se prestará especial atención al efecto de las fibras sintéticas recicladas sobre este fenómeno. Las fibras para hormigón dan ductilidad al hormigón por lo que también se plantea para este trabajo el análisis del comportamiento mecánico de los hormigones fabricados con Fibras Sintéticas Recicladas.

A continuación se detalla el programa experimental y la metodología elegida en este estudio, así como las dosificaciones utilizadas para analizar las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones fabricados. Para ello se realizará una comparativa entre los distintos tipos de fibras, así como entre las distintas proporciones de fibras incluidas en el hormigón, por lo que la dosificación de las distintas amasadas será muy similar, variando principalmente el tipo de fibras y la proporción de las mismas, así como la cantidad de aditivo plastificante, que se variará en función de la trabajabilidad deseada.

5.1 Programa experimental

Puesto que las fibras a analizar tienen gran diversidad de tamaños, se decide realizar un análisis sobre su comportamiento mecánico y de su efecto sobre el control de la fisuración. Para ello se fabricarán distintos tipos de hormigón cuya matriz mantiene la misma dosificación y se varía la cantidad de fibras para cada uno de ellos. Se han elegido 4 tipos de fibras comerciales combinando dos tamaños: macro-fibras (MA) y micro fibras (mi), y dos tipos de material: Metálicas (St) y sintéticas (Sy). Se han elegido para comparar los resultados obtenidos con las Fibras Sintéticas Recicladas (FSR), que se han añadido en 4 dosificaciones distintas.

En la campaña de ensayos mecánicos se van a utilizar macro-fibras comerciales y dos dosificaciones de Fibra sintética reciclada.

Para la matriz se van a utilizar dos dosificaciones distintas, en función del tipo de caracterización, con el fin de analizar eficientemente las propiedades de las fibras a estudiar, utilizando un hormigón estándar dentro del ámbito de estructural. Así pues, la dosificación elegida para la caracterización mecánica se recoge en la Tabla 2, y la dosificación elegida para ensayos de retracción en la Tabla 3. Esta última es una dosificación con mayor propensión a la retracción, por la cantidad de materiales finos y el tamaño máximo de árido.

Tabla 2. Dosificación de hormigón para ensayos de caracterización mecánica.

Material	CEM II 45.5 R	Agua	Arena	Árido grueso 4/6	Árido grueso 10/20	Filler	Superfluidificante
kg/m ³	275	200	800	425	525	50	2,75

Tabla 3. Dosificación de hormigón para ensayos de retracción.

Material	CEM II 45.5 R	Agua	Arena	Árido grueso 4/6	Árido grueso 6/10	Filler	Superfluidificante
kg/m ³	350	220	900	350	450	50	2,1

Las dosificaciones para cada tipo de fibra han sido elegidas en base a las que se utilizan comúnmente en construcción. Las dosificaciones para las Fibras Sintéticas Recicladas se han tomado doblando estas dosificaciones hasta un límite de 20kg/m³. En la Tabla 4 se detallan las dosificaciones para la caracterización mecánica, y en la Tabla 5 las elegidas para los ensayos de retracción.

Tabla 4. Dosificación de fibras para la caracterización mecánica.

Cantidad de fibras	Fibras comerciales			Fibras recicladas	
	Control	MASy	MASt	FSR (1)	FSR (2)
(kg/m ³)	0	5	30	10	20
%	0	0,55	1,11	1,11	2,22

Tabla 5. Dosificación de fibras para los ensayos de retracción.

Cantidad de fibras	Fibras comerciales					Fibras recicladas			
	Control	MASy	MASt	miSy	miSt	FSR (1)	FSR (2)	FSR (3)	FSR (4)
(kg/m ³)	0	35	35	0.9	35	1.8	3.6	5	10
%	0	0,55	1,3	0,1	1,3	0,2	0,4	0,55	1,11

En la Tabla 6 se detallan los ensayos elegidos para cada tipo de caracterización. En el apartado 5.3 se explica detalladamente cada uno de los ensayos y cómo se ha llevado a cabo la puesta en marcha de algunos de ellos.

Tabla 6. Ensayos elegidos para la fase experimental.

Ensayos de control	Caracterización mecánica	Evaluación de la retracción
- Resistencia compresión simple	- Flexotracción: A 4 puntos (ASTM C 1609)	- Retracción Plástica
- Consistencia	A 3 puntos (UNE EN 14651)	- Anillo restringido
	- Round Panel	- Cambio de longitud

5.1.1 Planteamiento del programa de trabajo

La Tabla 7 recoge el número de probetas fabricadas en cada ensayo una vez puesto en práctica el programa, se repitieron algunas como medida de control por posibles irregularidades que pudieran haber tenido lugar durante este proceso.

En cuanto a los ensayos de flexotracción a 4 puntos, no se realizaron los correspondientes al hormigón FSR (10kg), puesto que se entallaron las 6 probetas, por lo que se realizaron para este hormigón 6 ensayos de flexotracción a 3 puntos.

Tabla 7. Programa de ensayos.

	Test	Nº de probetas ensayadas
Caracterización mecánica	Resistencia a compresión a 7 días	4
	Resistencia a compresión a 28 días	4
	Flexotracción 3 puntos	3
	Flexotracción 4 puntos	3
	Round Panel	1
Retracción	Resistencia a compresión a 7 días	3
	Retracción plástica	1
	Retracción libre	6
	Anillo restringido	2

5.2 Materiales a utilizar

5.2.1 Cemento

Para la fabricación del hormigón a ensayar se ha utilizado el cemento CEM II/A-V 42.5 R (cemento portland con adiciones de cenizas volantes silíceas en un 6-20% con altas resistencias iniciales).

5.2.2 Agua

Para la elaboración de los distintos hormigones se ha utilizado agua corriente del laboratorio, puesto que existen precedentes de su uso y por lo tanto cumple con los parámetros establecidos en el artículo 27 de la EHE-08.

5.2.3 Áridos

Para realizar el hormigón se utilizarán los áridos machacados disponibles en el laboratorio, de clasificación (dmín/Dmáx): 10/20, 4/6; y arena rodada.

En la Tabla 8 se muestra la granulometría en peso que presentan los áridos utilizados.

Tabla 8. Granulometrías de los áridos utilizados.

Tamiz de la serie UNE	% Pasa			
	10/20	6/10	4/6	Arena
64	100	100	100	100
32	100	100	100	100
16	76,4	100	100	100
8	1	27.1	100	100
4	1	1	30	95,6
2	1	1	4,9	80
1	1	1	1	64,8
0,5	1	1	1	52,5
0,25	1	1	1	34,6
0,125	1	1	1	12,2
0,063	1	1	1	3,1

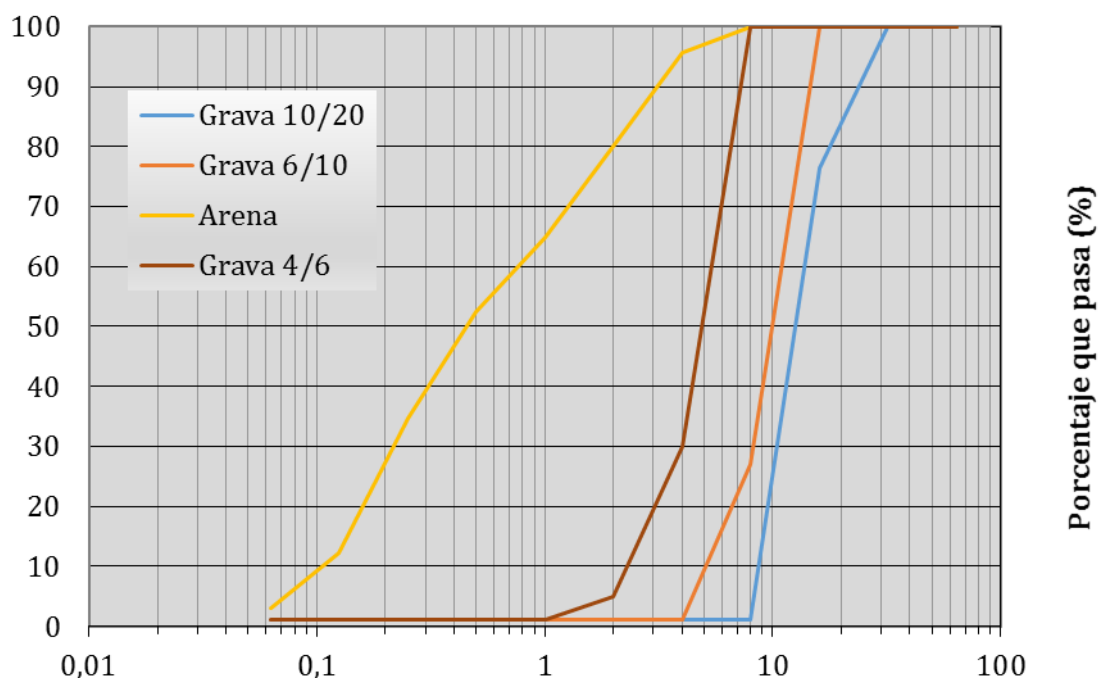


Figura 29. Curvas granulométricas de los áridos empleados.

5.2.4 Fluidificante

El asentamiento del cono de Abrams deseado es de entre 15 y 20 cm, puesto que se quieren conseguir hormigones de consistencia muy fluida para lograr una buena

trabajabilidad. Esto es porque se verterá en moldes poco convencionales e interesa que se llenen correctamente.

Por lo anteriormente mencionado, como aditivo se ha utilizado Sika® ViscoCrete® - 5980. Según el fabricante, se trata de un aditivo superplastificante de tercera generación indicado para hormigones de bombeo.



Figura 30. Garrafa del fluidificante utilizado.

5.2.5 Fibras

En la Figura 31 se pueden ver las fibras utilizadas en este estudio y sus características detalladas en la Tabla 9.



Figura 31. Fibras utilizadas.

Tabla 9. Fibras utilizadas en este estudio.

	Macro Sintética	Macro Metálica	micro sintética	micro metálica	Reciclada de Polipropileno
Designación	MASy	MASt	miSy	miSt	FSR
Longitud (mm)	48	35	12	12	10-40
Diámetro (mm)	0,74	0,55	0,031	0,2	Variable
Esbeltez	65	64	387	60	Variable
Densidad (kg/m³)	910	7850	910	7850	910
Forma	Rizada	Con ganchos	Monofilamento	Lisa	Irregular

5.3 Metodología

5.3.1 Ensayos a realizar

En este apartado se explican los ensayos elegidos para la fase experimental de este proyecto. Puesto que se prevé una aplicación en elementos superficiales, y las fibras estudiadas tienen una granulometría continua, se realizarán ensayos de caracterización mecánica y de retracción. Así como los pertinentes ensayos de control.

5.3.1.1 Ensayos de control

Los ensayos de control son el ensayo de consistencia y el ensayo a compresión simple del hormigón. Estos ensayos se han realizado con el fin de determinar si la consistencia y la resistencia a compresión simple de los hormigones fabricados se ven afectadas por la inclusión de los distintos tipos de fibras. El ensayo de consistencia se ha realizado de acuerdo a la norma UNE EN 12350-2:2009 y el ensayo de resistencia a compresión simple de acuerdo a la norma UNE EN 12390-3.

5.3.1.2 Ensayos mecánicos

Para la caracterización mecánica de las fibras se opta por dos tipos de ensayo estándar de comportamiento post-fisuración de las estructuras de hormigón reforzado con fibras, como son los ensayos de flexotracción y el ensayo estándar de placas

5.3.1.2.1 Ensayo de resistencia a flexotracción a 3 puntos UNE EN 14651

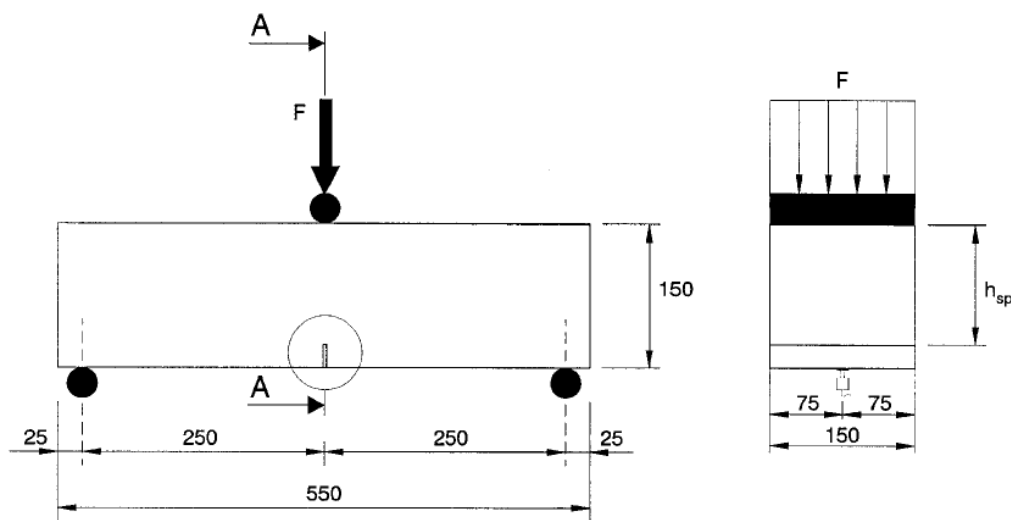
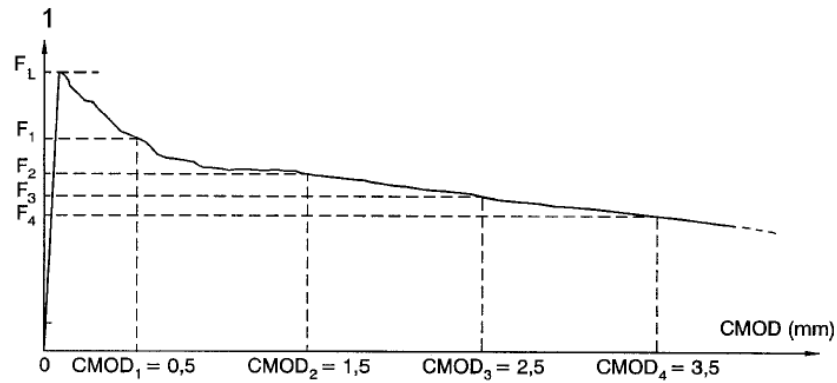


Figura 32. Esquema de la normativa para el ensayo de flexotracción a 3 puntos [25].

Después de realizar la entalla de 25 mm en el centro de la probeta, tal y como marca la norma, se realizan los orificios pertinentes en la misma, para colocar el captador de desplazamiento. Estos orificios se realizan a 8cm de distancia con la entalla. Se utiliza un captador de 25mm. Seguidamente, se marcan los puntos de apoyo en la probeta. Una vez preparada la probeta, se coloca en la máquina de ensayo, se conecta la máquina y el captador al equipo y se comienza el ensayo. Para ello se realiza una pre-carga manual, sobre la probeta, de 0.5 ó 1 kN. Si no se realiza esta pre-carga inicial, el tiempo de ensayo se ralentiza demasiado. A continuación, se conecta la máquina para que vaya cargando la probeta a una velocidad de 0.05mm/min hasta que la apertura de fisura es de 0.5mm y a partir de ese momento una velocidad de 0.2mm/min.

Una vez finalizado el ensayo se obtienen los valores de resistencia residual por flexión, de acuerdo con la norma, a partir de los datos obtenidos del equipo.



Leyenda

1 Carga F

Figura 33. Gráfica tipo mostrada en la norma.

$$f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

Ecuación 2. Cálculo de la tensión centro-luz.

f = tensión centro-luz (kPa)

F = carga aplicada por la prensa (kN)

l = longitud de vano (m)

b = ancho de la probeta (m)

h_{sp} = distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en centro de vano (m)

5.3.1.2.2 Ensayo de resistencia a flexotracción a 4 puntos

El procedimiento de este ensayo es similar al anterior, con algunas diferencias importantes. En este caso no se entalla la probeta, y se utilizan cuatro puntos de apoyo en lugar de tres. Además, cambia la disposición del captador de desplazamiento y su dimensión, que en este caso será de 50mm. En este caso, el captador se coloca verticalmente en un lateral de la probeta con el fin de medir la flecha en lugar de la apertura de fisura.

A partir de los datos obtenidos, se calcula la tensión pico inicial, la tensión pico y las resistencias residuales que marca la normativa.

$$f = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2}$$

Ecuación 3. Cálculo de la tensión.

f = Tensión (MPa)

P = Carga aplicada por la prensa (kN)

b = ancho (mm)

d = canto (mm)

5.3.1.2.3 Round Panel ASTM C 1550-08

Algunos estudios [26] hacen hincapié en la necesidad de realizar ensayos con mayores áreas de fractura, ya que los ensayos en vigas dan resultados con gran dispersión, debido a que el área ensayada es pequeña. El uso de placas rectangulares da lugar a una mala distribución de tensiones a causa de las irregularidades geométricas. La opción de una placa circular hace que la distancia entre la aplicación de la carga y los extremos de la placa sea siempre el mismo, distribuyendo uniformemente las tensiones internas.

Se trata de fabricar una muestra circular del hormigón objeto de estudio, a la que se le aplica una carga puntual en el centro. Debajo de la muestra se coloca un captador que mida la deformación.

El soporte sobre el que se coloca la muestra tiene tres pivotes con una bola que apoya sobre unos platillos, sobre los cuales se apoya la muestra.

Con los resultados obtenidos, se calcula la energía absorbida por la muestra, corrigiendo el valor de acuerdo con la siguiente fórmula.

$$W = W' \left(\frac{t_0}{t} \right)^\beta \left(\frac{d_0}{d} \right), \text{ donde, } \beta = 2.0 - \frac{\delta - 0.5}{80}$$

Ecuación 4 - Corrección de la energía absorbida.

W = energía absorbida corregida:

W' = energía absorbida obtenida en el ensayo.

t = Espesor medio de la pieza después del ensayo (medido en las caras de rotura).

t₀ = Espesor nominal de la pieza.

d = Diámetro medio de la pieza antes del ensayo (medido en los apoyos).

d₀ = Diámetro nominal de la pieza.

D = Deformación a la que se mide la energía absorbida.

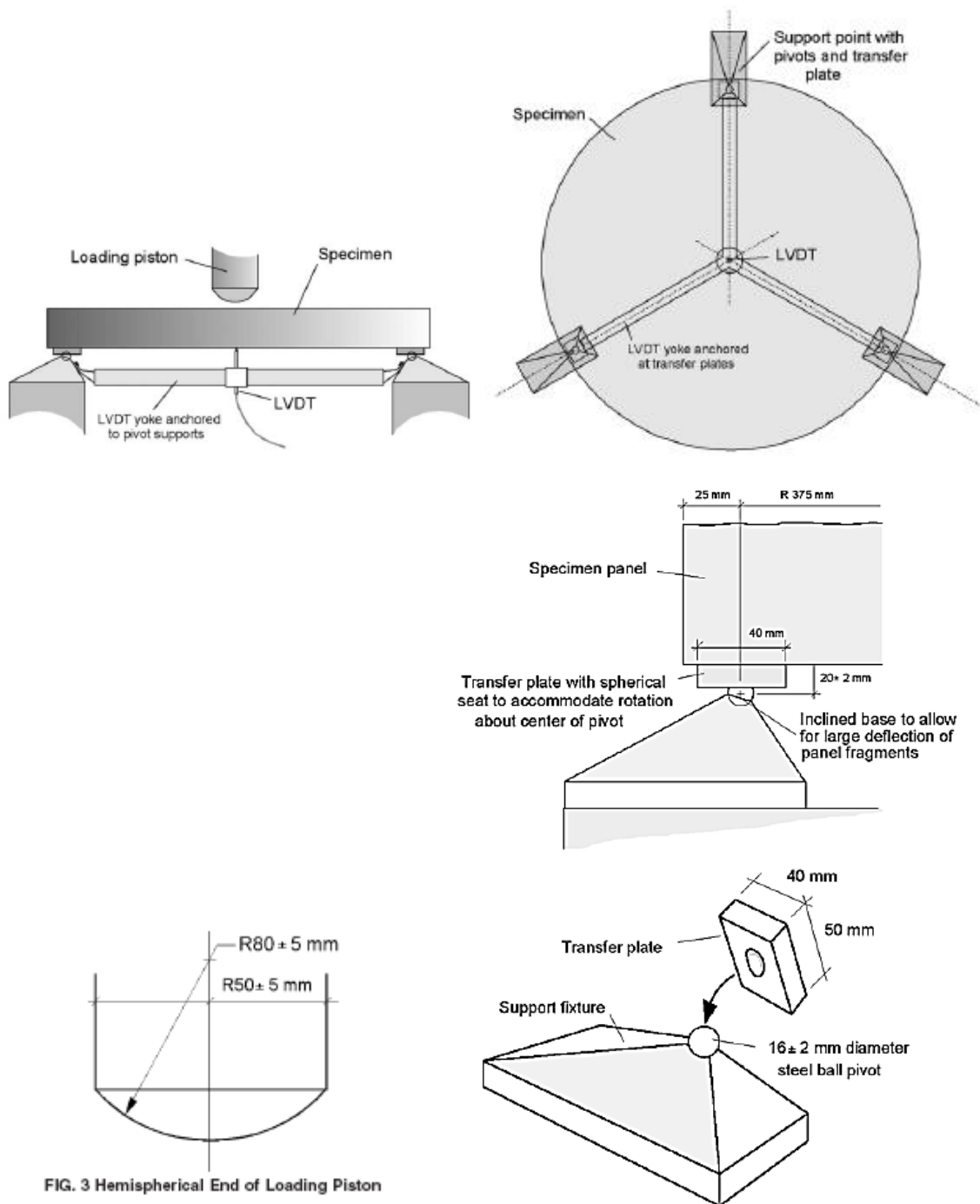


FIG. 3 Hemispherical End of Loading Piston

Figura 34. Croquis del soporte, apoyos y pistón de carga.



Figura 35. Fases del ensayo.

Se debe medir el diámetro de la probeta en los apoyos y se determinará el diámetro medio, si este diámetro es menor de 790mm o mayor de 810mm se debe descartar la muestra.

Se retiran los fragmentos de muestra y se hace una medida del espesor en 3 puntos de cada una de las superficies agrietadas y en el centro, de forma que se obtengan 10 medidas que den un valor representativo para calcular el espesor medio.

El ensayo realizado en el laboratorio para este proyecto tiene una modificación con respecto a las especificaciones de la normativa, el espesor de la pieza es de 100mm en lugar de 75mm. Sin embargo se han podido analizar los efectos de las fibras siguiendo el mismo procedimiento.

5.3.1.3 Ensayos de retracción

Para el estudio del efecto de las fibras sobre la retracción del hormigón se han elegido varios métodos de los que se han explicado en el apartado 4.3.4.2.

5.3.1.3.1 Ensayo de retracción libre

Se ha optado por realizar el ensayo de retracción libre mediante los métodos detallados en el apartado 4.3.4. Para las probetas colocadas en horizontal se opta por la colocación de un elemento plástico en el fondo de la probeta para garantizar el deslizamiento de

la misma. El acortamiento de la probeta se mide mediante unos captadores de desplazamiento y un equipo de registro que toma medidas cada 10 minutos. En la Figura 36

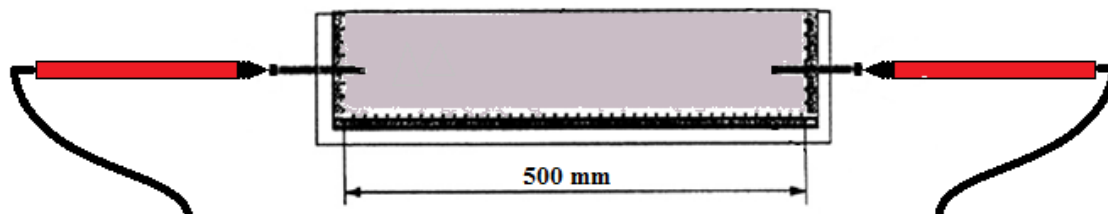


Figura 36. Esquema de molde con captadores para retracción libre - [16].



Figura 37. Montaje de ensayo de retracción libre durante la fase experimental.

5.3.1.3.2 Ensayo de retracción con anillo restringido

En cuanto a ensayos con coacción de movimiento, uno de los métodos que más aparece en la bibliografía es el ensayo del anillo restringido. Este ensayo está recogido en la norma ASTM C 1581 [21] y consiste en la fabricación de un anillo de hormigón alrededor de un anillo metálico sobre el que ejercerá una fuerza durante su endurecimiento. Este ensayo nos da información de la presión ejercida por el hormigón durante su endurecimiento, medida mediante galgas extensométricas colocadas en el interior del anillo metálico de forma diametralmente opuesta, una vez se crean la fisuras, cesa esta presión y se pueden contabilizar el número de fisuras y el tamaño de apertura de las mismas.

En la Figura 38 se puede ver la configuración del anillo de acuerdo a la norma ASTM 1581.

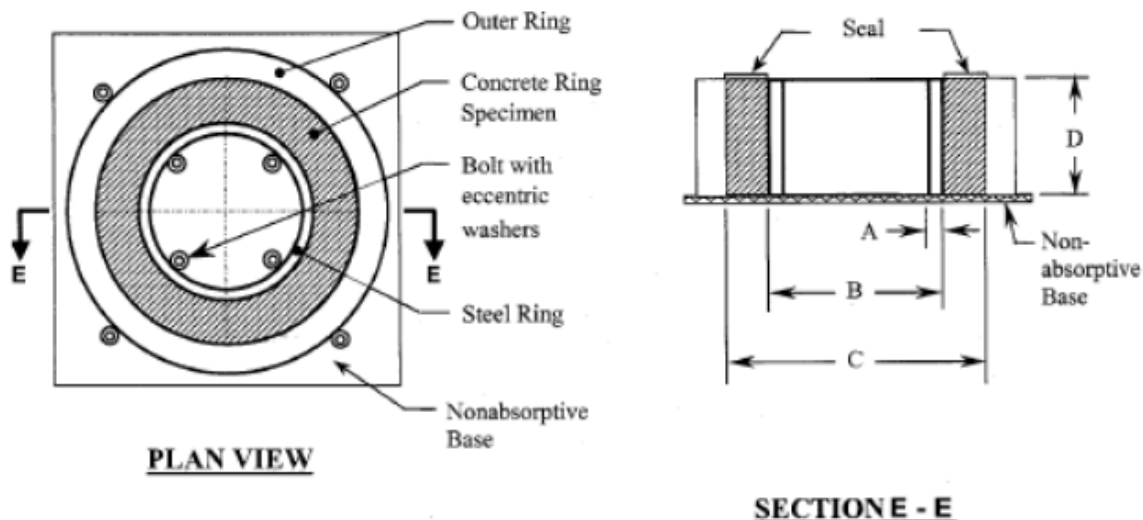


Figura 38. Anillo según la norma ASTM 1581 [21].

5.3.1.3.3 Ensayo de retracción plástica ASTM C 1579 - 06

Este ensayo está pensado para hormigones reforzados con fibras. Consiste fundamentalmente en comparar dos muestras de hormigón: una fabricada con un hormigón de control y otra con la mezcla a estudiar.

Los moldes tienen unas medidas de 355x560x100mm. En la base del molde se coloca una chapa de metal, cuyas dimensiones en planta coinciden con las de la base del molde, de forma que encaja perfectamente. La chapa tiene tres sobreelevaciones: dos de ellas se encargan de restringir el movimiento del hormigón, originado por la retracción, y una tercera, de mayor dimensión, situado en el centro, fuerza la aparición de la fisura en ese lugar.

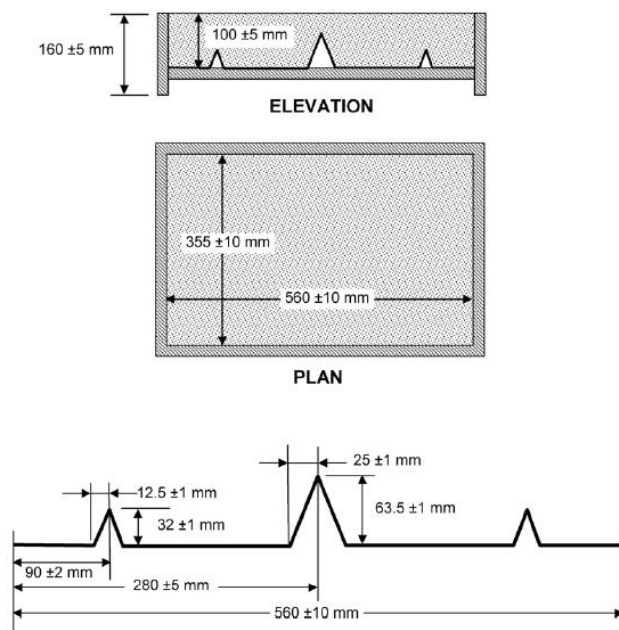


Figura 39. Croquis del molde y la base metálica de acuerdo a la norma ASTM 1579.

Todo el ensayo se realiza en una cámara de secado que proporciona unas condiciones ambientales uniformes. La cámara contiene en su interior unos ventiladores, un calefactor, un deshumidificador y un humidificador. Estos aparatos mantienen las condiciones ambientales constantes, que según la especificación de la norma deben ser de $36\pm 3^{\circ}\text{C}$ de temperatura y $30\pm 10\%$ de humedad.

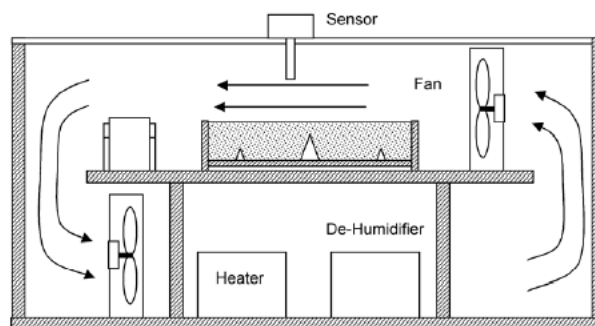


Figura 40. Croquis de la cámara propuesto por la norma ASTM C 1579.

5.4 Puesta en Marcha del ensayo de retracción plástica.

Este ensayo no se había realizado nunca antes en el laboratorio, por lo que el molde, en su totalidad, y la mampara se han fabricado exprofeso para este proyecto. Se ha habilitado una cámara, que se utiliza únicamente para la realización del ensayo. Las dimensiones de la cámara disponible limitan la configuración del ensayo por lo que se han hecho las modificaciones oportunas respecto del modelo inicial.

El calefactor se ha colocado en la parte superior de la cámara, en lugar de colocarlo en la parte inferior. Se ha colocado una mampara que cumple la función de canalizar el viento para alcanzar el mínimo 4.7m/s que exige la norma.

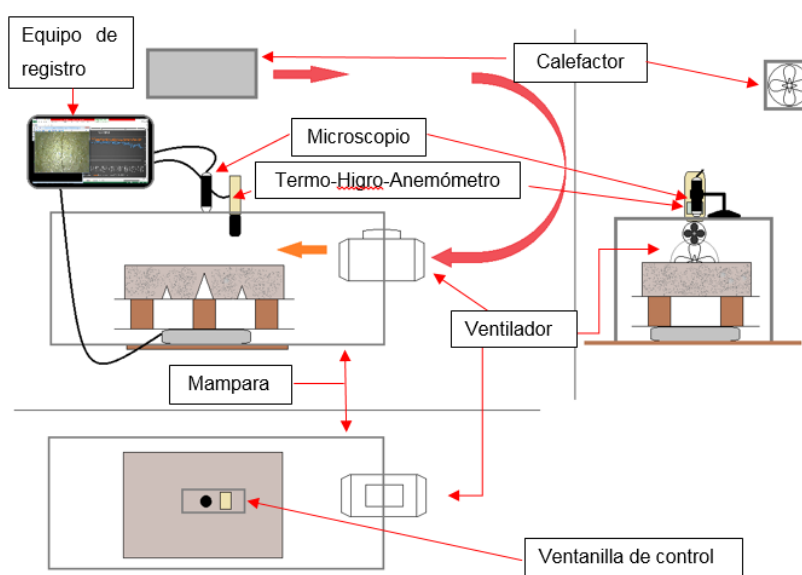


Figura 41. Croquis del montaje de la cámara configurado para este estudio.

La base metálica del molde fue fabricada, por encargo. Se decidió no doblarla como marcaba la normativa porque el radio de doblado resultaría excesivo. Se utilizó chapa de 1.5mm de espesor y se unieron las piezas mediante puntos de soldadura. El grosor de la chapa es ligeramente superior al marcado por la normativa (1.2 ± 0.05 mm) para evitar la deformación del acero a causa del calor desprendido en las labores de soldadura.

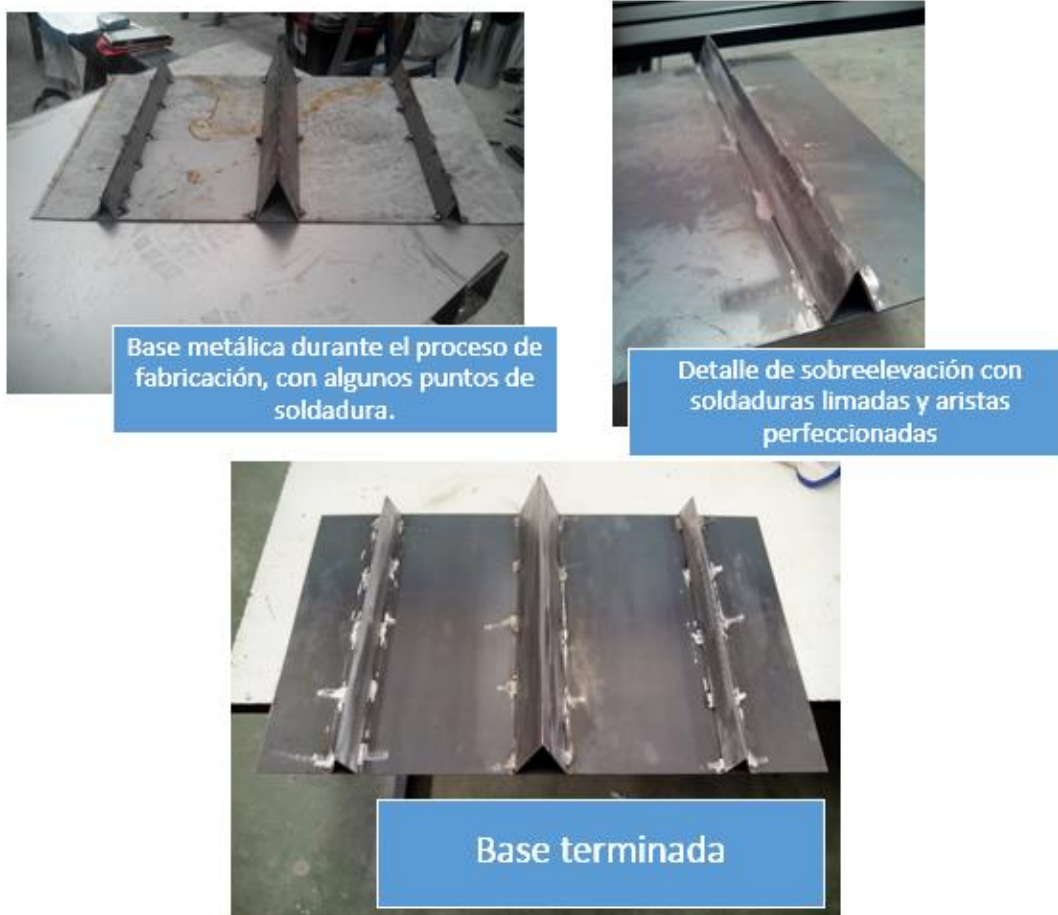


Figura 42. Fabricación de la base metálica.

El resto del molde se realizó en madera de conglomerado de 1.5 cm de espesor, material que contempla la norma.

Por todo lo anterior, se llevan a cabo varias pruebas para la comprobación del funcionamiento, tanto del molde, como de la cámara de retracción.

Para la comprobación de las condiciones de humedad, temperatura y velocidad del viento, se dispone un dispositivo higo – termo – anemómetro. Por otro lado se dispone un microscopio USB y una báscula que registra el peso de la probeta. Tanto el microscopio como el higo – termo – anemómetro se introducen en la ventanilla de control situada la parte superior de la mampara para poder controlar las condiciones a 10 cm de la cara superior de la probeta a ensayar.

El microscopio se coloca sobre un soporte independiente, para que no se vea afectado por las vibraciones que provoca el ventilador sobre la mampara.



Figura 43. de izquierda a derecha: Termo - higo - anemómetro, microscopio y báscula.

Todos estos dispositivos se conectan al ordenador para poder obtener datos continuos del ensayo.

5.4.1 Pruebas de funcionamiento.



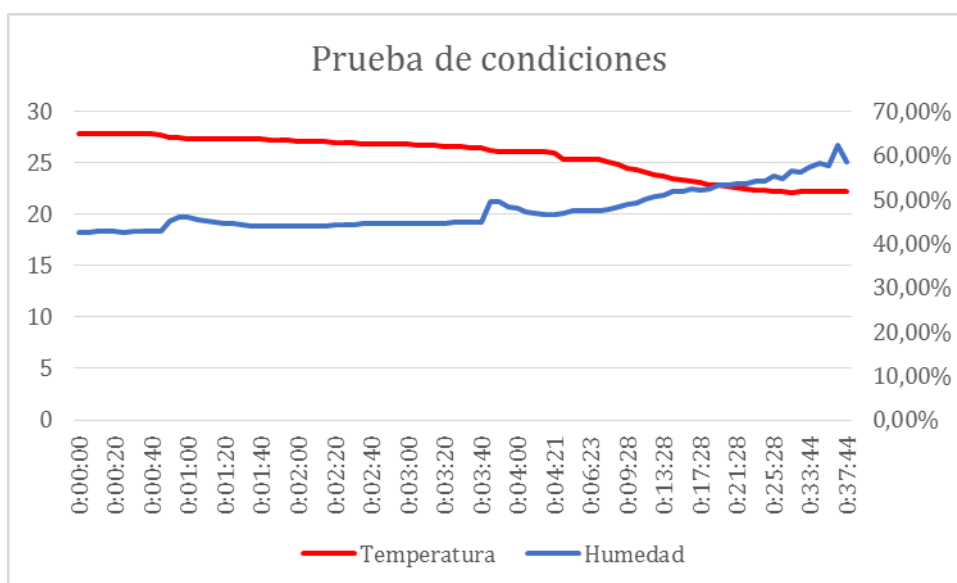
Figura 44. Interior de la cámara y aparatos conectados al ordenador (izquierda) e interior de la mampara con molde vacío (derecha)

A continuación se hace un pequeño análisis de las distintas pruebas y posteriores modificaciones que se llevaron a cabo con el fin de realizar el ensayo en las condiciones idóneas.

Prueba de condiciones (humedad y temperatura)

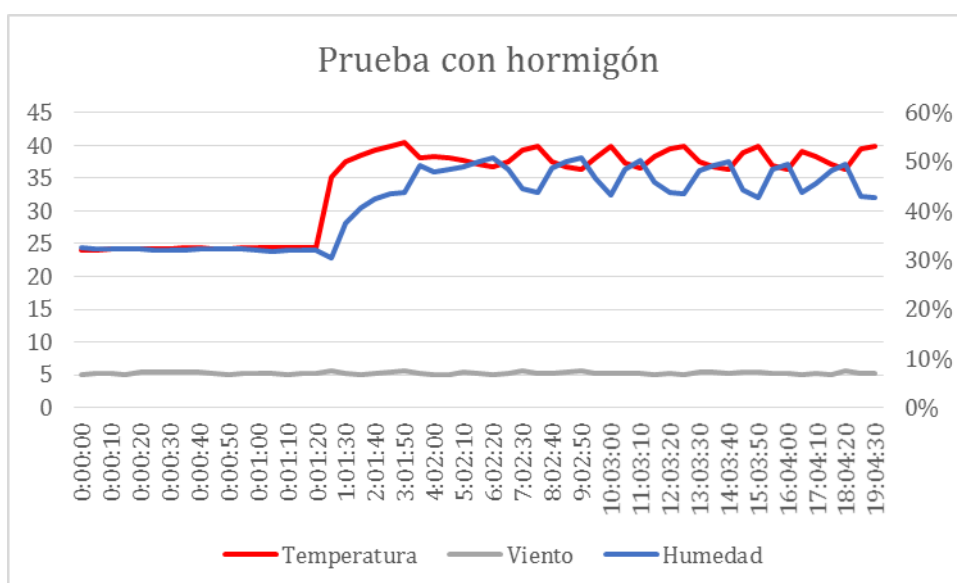
Para una primera comprobación de la cámara se tuvieron encendidos tanto el calefactor como el ventilador industrial durante 24h para comprobar que las condiciones se estabilizan. Posteriormente se hace una medida puntual y se comprueba que la humedad oscila entre 42% y 62% y la temperatura entre 22°C y 28°C.

Se observa una humedad excesiva y una temperatura escasa.



Prueba de fisuración del hormigón

Puesto que la prueba anterior tenía una temperatura por debajo de los 36°, en este caso se sube la temperatura del termostato. Según la normativa, el hormigón de control debe tener una apertura de fisura mayor de 0.5 mm, así que se hace una primera amasada de prueba con el fin de comprobar si el molde genera la fisura deseada.



Como se puede ver en el gráfico, la velocidad del viento se mantiene constante, tras una hora en la cámara, tanto la temperatura como la humedad, comienzan a aumentar. Después se estabilizan, observándose unas fluctuaciones que son debidas al encendido y apagado del calefactor con termostato.

Para garantizar una temperatura constante desde el inicio del ensayo, se decide mantener la cámara encendida al menos 24h antes de la realización del ensayo. De esta

manera la cámara pierde menos temperatura cuando se procede al vertido del hormigón en el molde y puesta en marcha de los aparatos.

El aumento excesivo de la humedad puede deberse a la presencia de la bandeja de control de evaporación. Tras comprobar que la tasa de evaporación cumple con lo especificado, se opta por extraer la bandeja de la cámara.

Tras la primera prueba con hormigón, se comprueba que no aparece fisura en el mismo, por lo que se optará por hacer una modificación en el molde.

Como se ha visto en el apartado 4, En algunos estudios se opta por la inclusión de unos pernos en los laterales del molde que generen una coacción del movimiento en los extremos del mismo. La modificación del molde utilizado para este ensayo consiste en incluir unos ganchos de varilla roscada, que lleguen hasta las restricciones que generan los resaltos de la base, modificando así mínimamente el ensayo propuesto en la normativa.



Figura 45. Molde modificado.

Tras la modificación del molde se hace una última prueba con una pequeña amasada del hormigón control utilizado para los ensayos mecánicos, que da lugar a una fisura insuficiente. Por lo que se pasa a la dosificación para los ensayos de retracción, dando lugar a una serie de ensayos satisfactorio que se analiza en el apartado 6.



Figura 46. Aspecto de la probeta fisurada tras el ensayo.

5.4.2 Conclusiones sobre el método.

Se deduce de las pruebas realizadas que este método de ensayo no es válido para cualquier tipo de hormigón. La apertura de fisura en la prueba realizada con la dosificación utilizada en los ensayos mecánicos es insuficiente, por lo que no se podría realizar una comparativa entre las distintas fibras.

Las coacciones sobre la masa de hormigón resultan insuficientes si se siguen las especificaciones de la norma. La chapa metálica propuesta, se prevé de un espesor demasiado reducido ya que las tensiones provocadas por la masa de hormigón provocarían deformaciones en la misma. En la práctica desarrollada y expuesta en este documento no se producen estas deformaciones gracias a la rigidez del molde. Además de la experiencia adquirida en la puesta en marcha del ensayo existen antecedentes que llevan a pensar que es necesario normalizar una modificación en el molde que fortifique las coacciones.

Con las modificaciones oportunas, se llega a un ensayo que resulta de gran utilidad para la evaluación de la retracción plástica, comparando directamente la apertura de fisura entre hormigones fabricados con distintas fibras.

Después de realizar las pruebas oportunas y comprobar que el método funciona correctamente, se decide fabricar un molde en acero (Figura 47) para lograr una mayor rigidez. De esta manera se pretende conseguir que en ensayo no se vea afectado por las deformaciones que pueda sufrir el molde tras su uso continuado. Para optimizar la puesta en marcha se mejoró el túnel de viento, fabricando uno de madera de 0.5mm de espesor, que continúa garantizando la velocidad de viento requerida por la norma. En

la Figura 48 se puede ver un esquema de la configuración final del ensayo después de las modificaciones mencionadas.

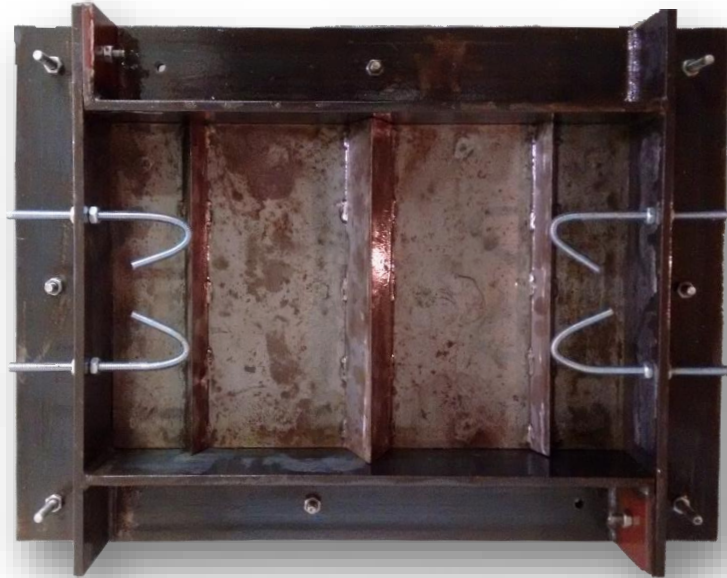


Figura 47. Molde de acero fabricado para ensayos de retracción plástica.

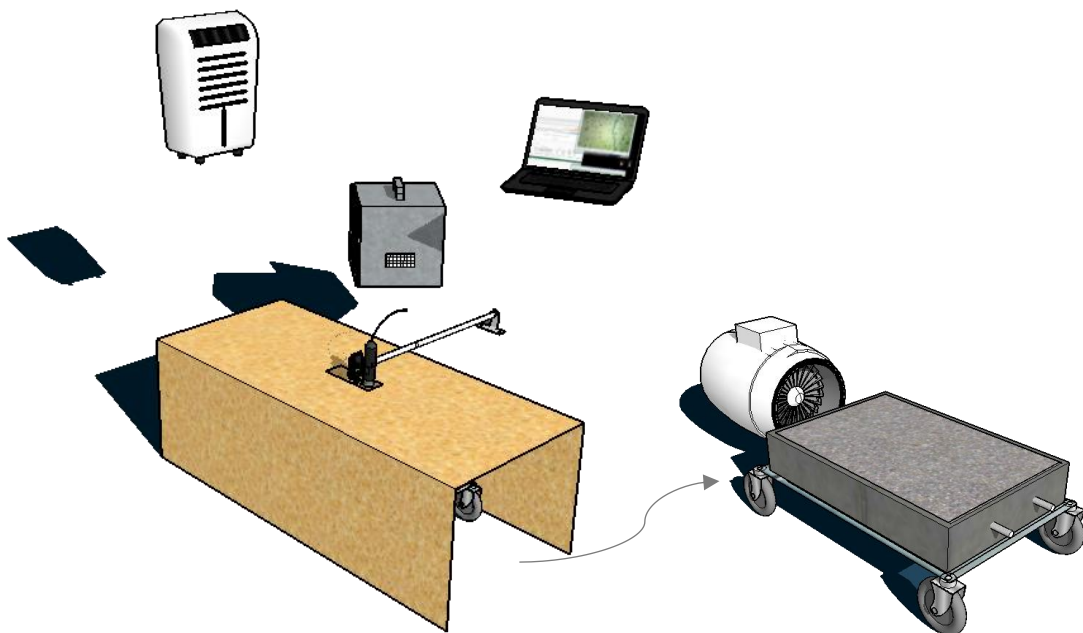


Figura 48. Configuración final del ensayo

5.5 Puesta en marcha del ensayo de retracción mediante anillo restringido

El procedimiento de este ensayo se detalla en el apartado 4.3.4.2.1. Para llevar a cabo las mediciones de tensión ejercida por el hormigón sobre el anillo metálico que restringe el movimiento del anillo de hormigón del ensayo, se colocan 2 galgas extensométricas diametralmente opuestas, por lo que hubo que hacer varias pruebas de funcionamiento para confirmar la correcta colocación de las galgas y las mediciones tomadas. En la Figura 49 se puede ver la probeta de hormigón que se fabrica en este ensayo.



Figura 49. Probeta de hormigón para ensayo de anillo restringido durante las pruebas de funcionamiento.

En este ensayo es conveniente determinar la edad de aparición de las fisuras por lo que, al igual que en el ensayo de retracción plástica, es conveniente programar una cámara que efectúe fotos cada cierto tiempo, con el fin de no alterar las condiciones ambientales de la cámara al hacerlo de forma manual. Sin embargo, en este ensayo la localización de la fisura no es evidente, ya que se trata de una probeta anular sometida a las mismas condiciones en toda su superficie. Con esto se plantean varias opciones: colocar varias cámaras alrededor del anillo, hacer menos lecturas de forma manual tratando de alterar mínimamente las condiciones ambientales o programar un dispositivo rotatorio que vaya haciendo fotos a lo largo de la superficie de hormigón. La opción de la medición manual se descartó ya que, debido a las dimensiones de la cámara de retracción, resulta imposible no alterar las condiciones climáticas al abrir la puerta, finalmente se opta por fabricar un aparato que se pueda programar para que efectúe fotos a lo largo de la superficie del anillo. El montaje consiste en unir la cámara a un perfil en U acoplado a un motor paso a paso. La cámara da una vuelta completa al anillo y cuando llega al final de lo que se le ha marcado comienza a dar una vuelta al contrario del recorrido hasta que pulsa un interruptor que le indica el inicio de la siguiente vuelta. De esta forma se evita el enredo de los cables.

Desde el ordenador se pueden configurar los siguientes parámetros

- Ángulo de recorrido del motor
- Ángulo entre fotografías y cantidad
- Tiempo de espera de estabilización de la cámara
- Tiempo de espera entre una vuelta y la siguiente

El montaje y el resultado final se pueden ver en la Figura 50 y la Figura 51.

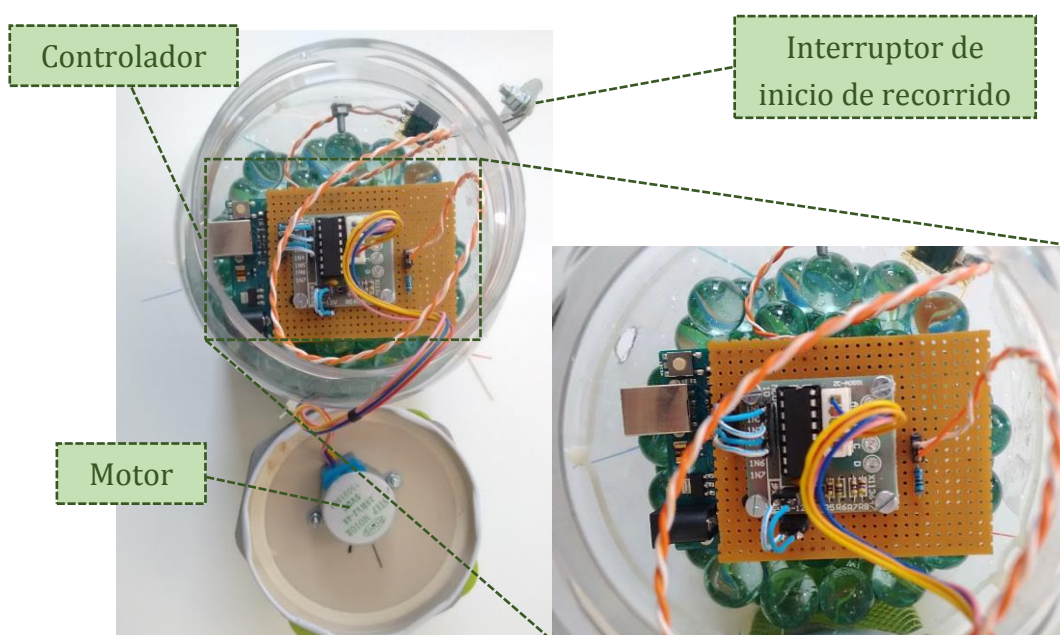


Figura 50. Montaje del dispositivo de toma de imágenes.



Figura 51. Dispositivo de toma de imágenes.

5.5.1 Conclusiones sobre el método

A priori, la puesta en marcha del método del anillo restringido parece sencillo de llevar a cabo. El molde es sencillo, aunque dificulta la puesta en obra del hormigón a ensayar, lo que puede dar lugar a la aparición de coqueras en la probeta. Esto podría afectar a los resultados del ensayo. La toma de datos de aparición de fisura no es tan sencilla, aunque en este estudio se ha solucionado satisfactoriamente.

6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se hace un análisis comparativo de resultados obtenidos para cumplir con el objetivo de evaluar la viabilidad de las fibras sintéticas recicladas procedentes de sacas fuera de uso, como refuerzo para el hormigón.

Después de realizados todos los ensayos, se obtienen los datos recogidos en los correspondientes equipos de registro.

Se presentan los resultados obtenidos en tres apartados. El primero, corresponde con los resultados de control tanto para las amasadas de la caracterización mecánica como para las amasadas de los ensayos de retracción que muestran el efecto que tienen las fibras sobre el hormigón fabricado. En segundo lugar, los resultados de la caracterización mecánica. Por último se expondrán los resultados de la fase de retracción.

6.1 Efecto de las fibras sobre el hormigón.

Para determinar el efecto que ejercen las fibras sobre los hormigones se han realizado ensayos de control en todas las amasadas siguiendo la norma UNE EN 12390-3 para la determinación de la resistencia a compresión simple y el ensayo de descenso de cono de Abrams UNE EN 12350-2:2009 para determinar la consistencia de cada uno de los hormigones.

6.1.1 Ensayos de control para las amasadas de caracterización mecánica.

La Figura 52 recoge los valores de descenso del cono de Abrams para las amasadas de los ensayos de caracterización mecánica.

Los valores de aditivo en las distintas amasadas se varían en función de la trabajabilidad buscada. En la Tabla 10 se pueden ver porcentajes de aditivo añadido a cada uno de los hormigones.

El hormigón de control contiene un 1% de aditivo, sobre el peso de cemento, sin embargo, con la misma dosificación base, para los hormigones con fibras se requiere aumentar la trabajabilidad. Como se puede ver en la Figura 52, las amasadas de Fibra Sintética Reciclada con dosificación de 20kg se observa un escaso descenso del cono de Abrams, a pesar de ser dónde se ha añadido un mayor porcentaje de aditivo, de lo que se deduce que las Fibras Sintéticas Recicladas tienen una influencia notable sobre la consistencia.

Tabla 10. Valores de aditivo para los hormigones fabricados con las distintas fibras.

	Control	MA Sy	MA St	FSR (10kg)	FSR (20kg)
Aditivo	1%	1.40%	1.40%	1.50%	1.60%

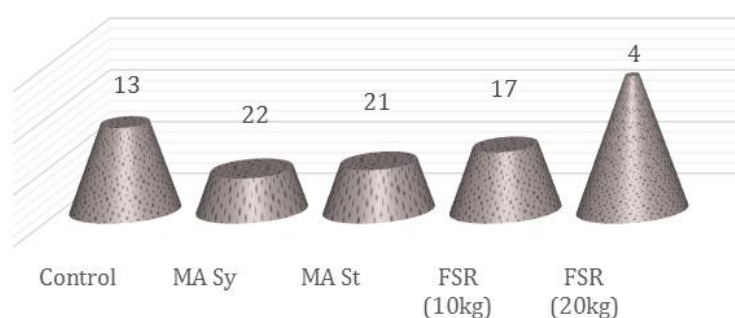


Figura 52. Valores de descenso de cono de Abrams en cm. para las amasadas de la campaña de caracterización mecánica.

En la campaña de ensayos de caracterización mecánica, se realizaron ensayos de resistencia a compresión a 7 y a 28 días. En la Figura 53 se puede ver que existe homogeneidad en las resistencias de las distintas amasadas, tanto a 7 como a 28 días. Los valores de resistencia mostrados en la

Tabla 11 muestran, como es de esperar, que a los 7 días se alcanza la mayor parte de la resistencia a compresión.

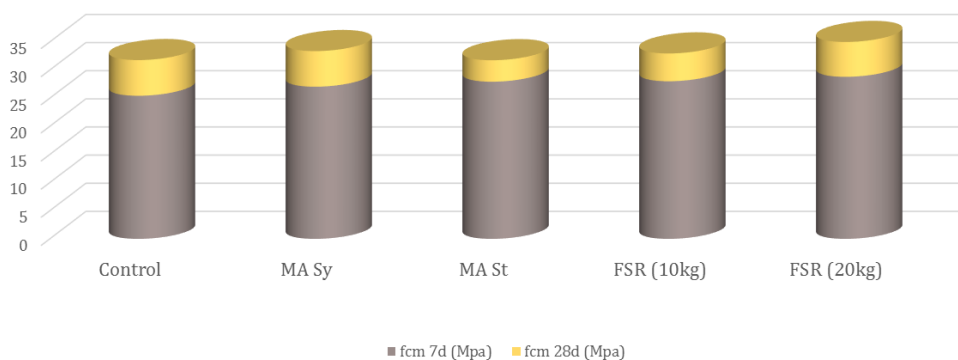


Figura 53. Resistencias a compresión simple para las amasadas de la campaña de caracterización mecánica.

Tabla 11. Resultados de ensayos de resistencia para las amasadas de la campaña de caracterización mecánica.

Hormigón	Control	MA Sy	MA St	FSR (10kg)	FSR (20kg)
fc 7d (MPa)	24,98	27,5	27,4	28,55	30,34
fc 28d (MPa)	31,45	30,65	33,75	35,37	35,52

6.1.2 Ensayos de control para las amasadas de retracción.

En el caso de las amasadas de retracción se ha mantenido constante la cantidad de aditivo en un 0.6% en peso de cemento, (salvo en el caso de FSR (1.8kg) y FSR (3.6kg) dónde no se conoce la cantidad exacta de aditivo añadido), para evaluar el efecto que tienen las fibras sobre la consistencia. En la Figura 54 se puede ver que los valores de descenso en el cono se reducen con el aumento de la cantidad de fibras. Este resultado se ajusta a lo esperado. Se puede corregir esta influencia aumentando ligeramente la cantidad aditivo en la dosificación

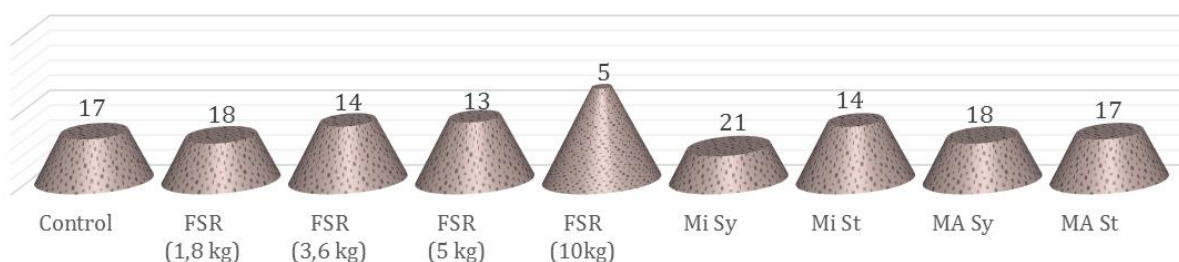


Figura 54. Valores de descenso de cono de Abrams en cm. para las amasadas de la campaña de control de retracción.

Debido al tamaño de la amasadora disponible sólo se fabricaron 3 probetas cilíndricas para cada ensayo de retracción. Dado que la retracción se mide a edades tempranas, se decidió ensayar estas probetas a 7 días. Excepto en el caso de la amasada con 10kg de fibra sintética reciclada y las amasadas de macro fibra comercial, que se ensayaron a los 28 días debido a condiciones de disponibilidad del laboratorio.

La resistencia a compresión no se ve afectada por la inclusión de fibras, en la Figura 55 se puede observar que se alcanzan resistencias similares en todos los casos.

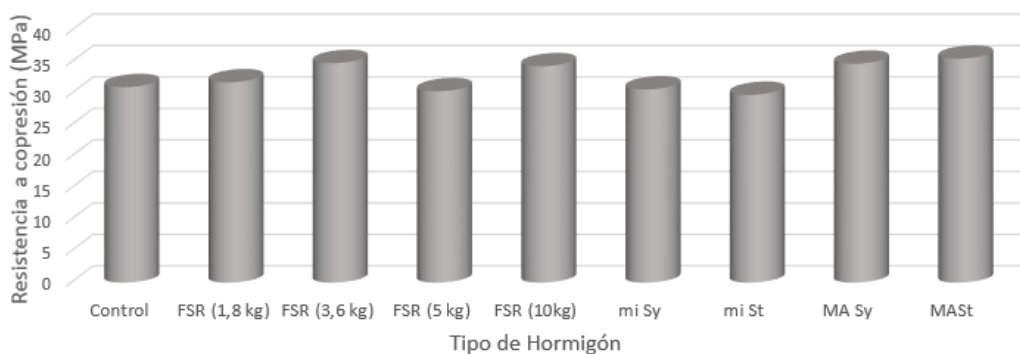


Figura 55. Resistencia a compresión simple para las amasadas de la campaña de control de retracción.

Los resultados mostrados en la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos tanto en las probetas ensayadas a 7 como a 28 días dónde, en ambos casos, se ven similitudes entre probetas ensayadas.

Tabla 12. Resultados de ensayos de resistencia para las amasadas de la campaña de control de retracción.

Hormigón	Contro l	FSR (1,8 kg)	FSR (3,6 kg)	FSR (5 kg)	FSR (10kg)	mi Sy	mi St	MA Sy	MA St
fc 7d (MPa)	31,06	31,82	34,87	30,4		30,7	29,83		
fc 28d (MPa)					34,37			34,77	35,57

6.1.3 Conclusiones

Se puede concluir que a incorporación de fibras afecta a la consistencia de los hormigones, sin embargo, se puede corregir aumentando la cantidad de aditivo siempre y cuando se tenga la precaución de no llegar a la segregación.

En cuanto a la resistencia a compresión simple, no se ve afectada por la inclusión de fibras recicladas.

6.2 Caracterización mecánica

Para determinar si las fibras recicladas de mayor tamaño dotan al hormigón de resistencias post-fisuración

Para la caracterización mecánica de las fibras sintéticas recicladas, se opta por tomar dos dosificaciones diferentes de las mismas, teniendo dos hormigones con estas fibras: el primero FSR (10kg) con una dosificación del doble de la recomendada para fibras sintéticas comerciales; el segundo corresponderá a 20kg de fibra por m³ de hormigón.

En esta fase del estudio se realizan ensayos de Flexotracción a 3 puntos, en el que se determina la relación Carga-apertura de fisura; ensayo de flexotracción a 4 puntos, en el que se determina la relación carga-flecha; y ensayos de placa circular (Round Panel) en el que se determina la relación carga-flecha de la pieza.

En el apartado Anejos se pueden encontrar los valores individuales para cada probeta ensayada en cada uno de los ensayos.

6.2.1 Resultados de flexotracción de acuerdo a la norma UNE EN 14651

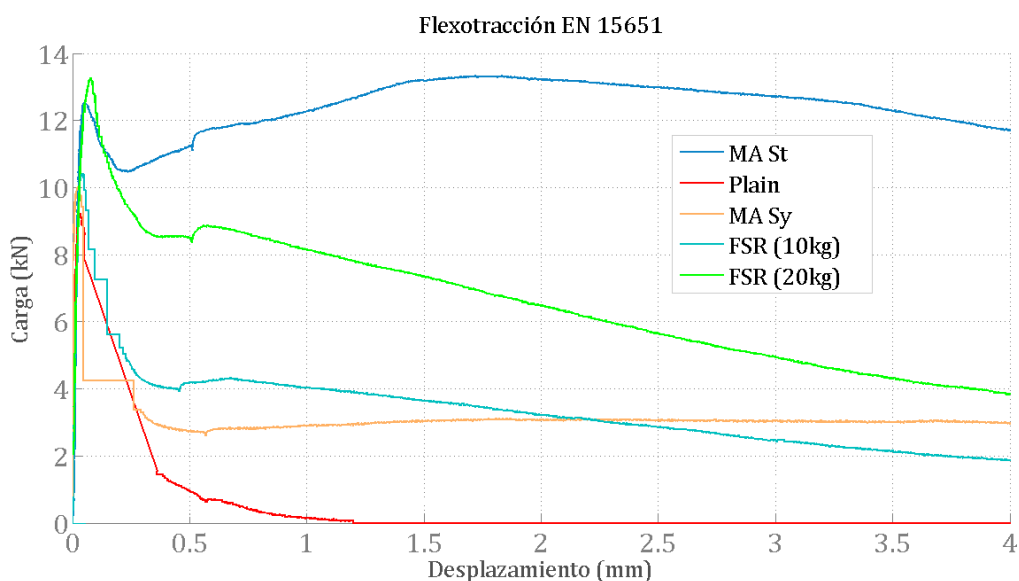


Figura 56. Gráfica de resultados de ensayo de Flexotracción a 3 puntos (UNE EN 15651).

La Figura 56 muestra las gráficas de resultados de los hormigones ensayados a 3 puntos. La carga pico, como cabría esperar, es muy similar en todos los casos. Las resistencias residuales de las probetas con fibras recicladas, después de la fisuración, consiguen superar a las obtenidas con macro-fibra sintética comercial, manteniendo esa tendencia a lo largo del ensayo para la dosificación de 20kg, no así con la dosificación de 10 kg que queda por debajo para altas aperturas de fisura. Las resistencias residuales de las probetas con fibras metálicas superan de forma evidente a las del resto.

La Tabla 13 muestra los datos en MPa de carga pico y resistencias residuales para cada tipo de hormigón ensayado en esta fase. La última columna de la tabla muestra la clasificación que se les daría de acuerdo a lo establecido en el código modelo.

Tabla 13. Resultados de ensayos de flexotracción a 3 puntos según UNE EN 14651.

	$f_l(\text{MPa})$	$f_{r1}(\text{MPa})$	$f_{r3}(\text{MPa})$	$f_{r1}/f_l(\text{MPa})$	$f_{r3}/f_{r1}(\text{MPa})$	Clasificación según código modelo
Control	2.99					
MA Sy	3.41	0.81	1.01	0,23	1,24	1d
MA St	3.91	3.02	3.44	0,77	1,13	3d
FSR (1)	3.38	1.31	0.87	0,38	0,66	1.5a
FSR (2)	3.68	2.44	1.73	0,66	0,70	2.5b

De acuerdo con el Anejo 14 de EHE para que las fibras puedan ser consideradas con función estructural la resistencia característica residual a tracción por flexión debe cumplir:

$$f_{r1} \geq 0.4 \cdot LOP \text{ y } f_{r3} \geq 0.2 \cdot LOP$$

Ecuación 5. Criterios de la EHE 08 considerar las fibras con función estructural.

Observando los resultados de flexotracción a 3 puntos se observa en el caso de la dosificación de 10 kg/m³ de FSR, el resultado queda cerca del mínimo exigido sin llegar a alcanzarlo para f_{r1} . Con una dosificación de 20kg de fibras sintéticas recicladas sí se superan los límites establecidos por la EHE.

Por otra parte el capítulo 5 del código modelo establece que para que las fibras para hormigón puedan ser sustituidas por armadura convencional, deben cumplir los siguientes criterios:

$$f_{r1} / f_l > 0.4$$

$$f_{r3} / f_{r1} > 0.5$$

Ecuación 6. Criterios del código modelo para la sustitución de armaduras por fibras.

El hormigón reforzado con 10kg de fibra sintética reciclada queda cerca de cumplir con estos criterios superando el valor de 0.5 para f_{r3} / f_{r1} y quedándose 0.02MPa por debajo del valor requerido para f_{r1} / f_l . Con la dosificación de 20kg de Fibra Sintética Reciclada se superan estos valores, por lo que podría ser considerada en la sustitución de armadura.

6.2.2 Resultados de flexotracción de acuerdo a la norma ASTM C 1609

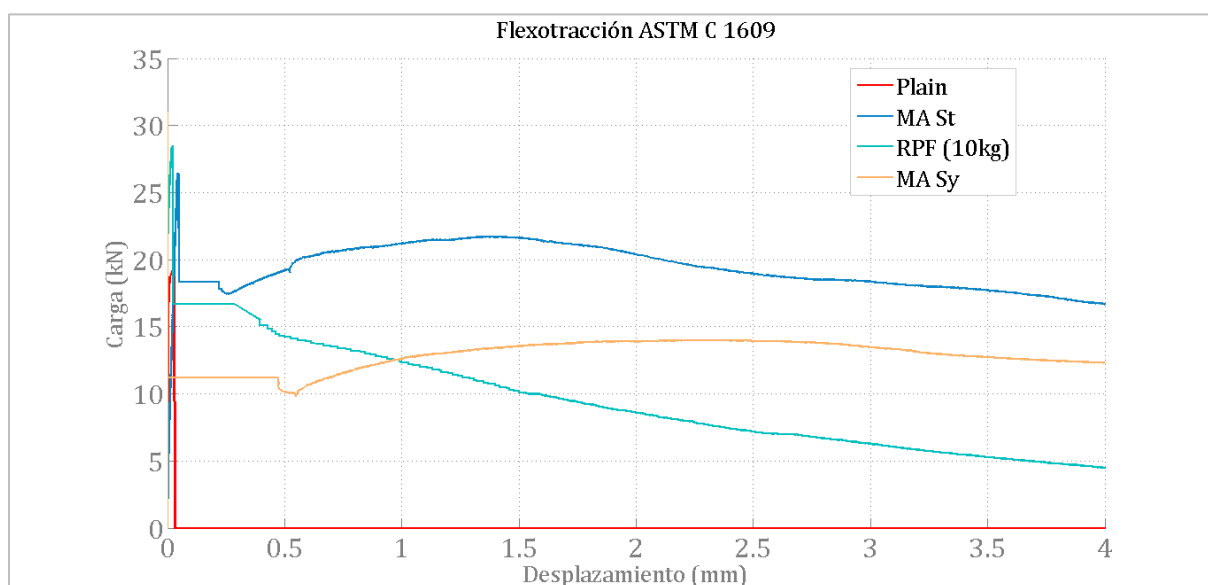


Figura 57. Gráfica de resultados de Flexotracción a 4 puntos (ASTM C 1609).

Tabla 14. Resultados de ensayos de flexotracción según ASTM C 1609.

	f_p	f_{600}^D	f_{150}^D
Control	2.84	0	0
MA Sy	4.83	1.90	2.03
MA St	3.57	3.28	2.65
FSR (1)	4.20	1.53	0.53

Los ensayos de flexotracción a 3 y 4 puntos en hormigones con FSR muestran resultados similares, obteniéndose resistencias residuales altas para bajas aperturas de fisura continuando con un descenso regular hasta el final del ensayo. Con altas dosificaciones de FSR se logran resultados que incluso superan los obtenidos con la fibra de referencia (MA Sy).

6.2.3 Resultados de ensayo de placa (Round Panel ASTM C 1550)

La normativa ASTM marca una medida tensión-deformación hasta los 40mm de flecha, sin embargo, Debido a unos desajustes durante el ensayo, para los hormigones fabricados con fibras comerciales se tomaron las medidas hasta 20mm de desplazamiento.

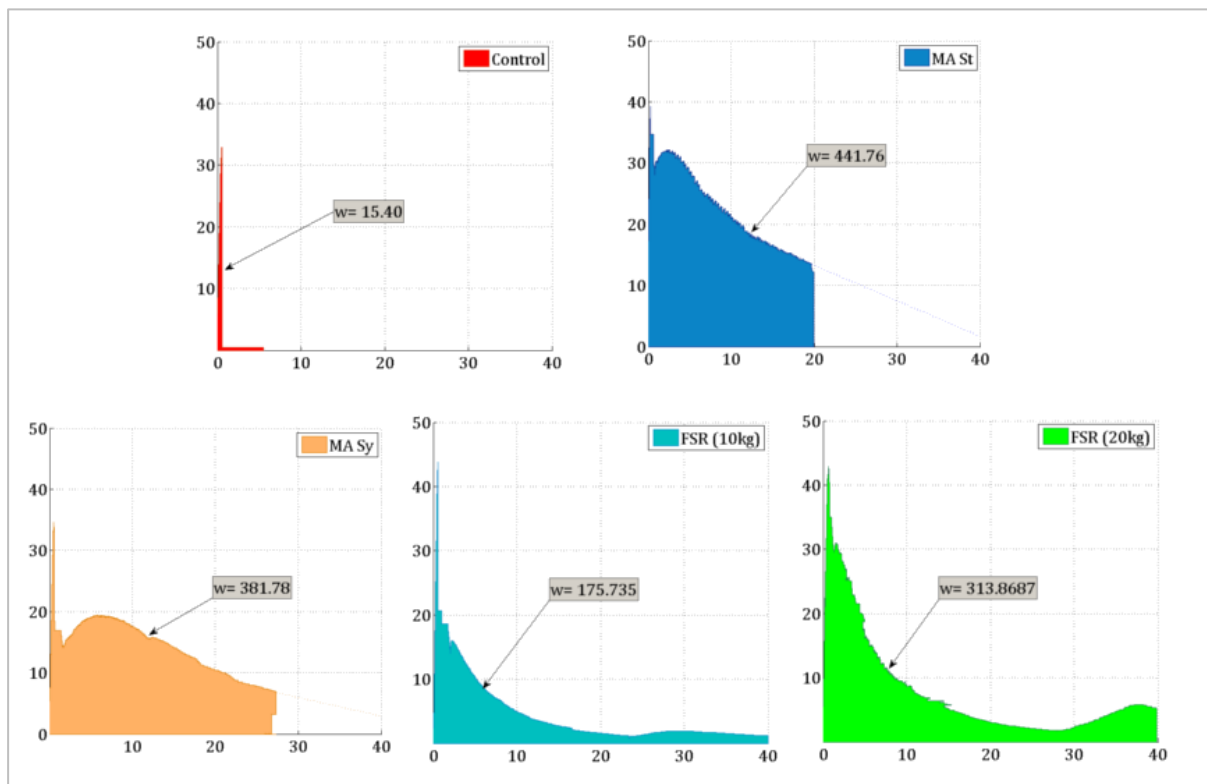


Figura 58. Energías absorbidas en el ensayo de placa circular (Round Panel).

En este ensayo se observa un buen comportamiento post – fisuración en los primeros instantes después de la aparición de la fisura incluso para la dosificación de 10kg de FSR para el hormigón reforzado con 20kg/m³ de FSR con una energía absorbida similar a la obtenida con fibras sintéticas comerciales

Tipo de hormigón	Control	MA St	MA Sy	FSR (10kg)	FSR (20kg)
Carga Pico (kN)	32.90	39.24	34.56	43.77	42.96
Energía absorbida (20mm)	15.39	443.09	320.29	144.89	247.11

Todas las fibras presentan una carga pico similar, sin embargo, sin tener en cuenta el comportamiento de las fibras metálicas, que tienen mayor resistencia y, por lo tanto, demuestran tener mayor absorción de energía y mayores resistencias post-fisura, el hormigón FSR (10kg) presenta un comportamiento resistente mucho menor que el MASy. No es el caso del hormigón FSR (20kg), que al tener mayor proporción de fibras muestra altas resistencias en los primeros instantes después de la fisuración.

Las Fibras Sintéticas recicladas con dosificación de 10kg/m^3 presentan una absorción de energía escasa, sin embargo con una dosificación de 20 kg/m^3 se consigue duplicar el resultado, llegando a un valor más cercano al obtenido con Fibra MA Sy.

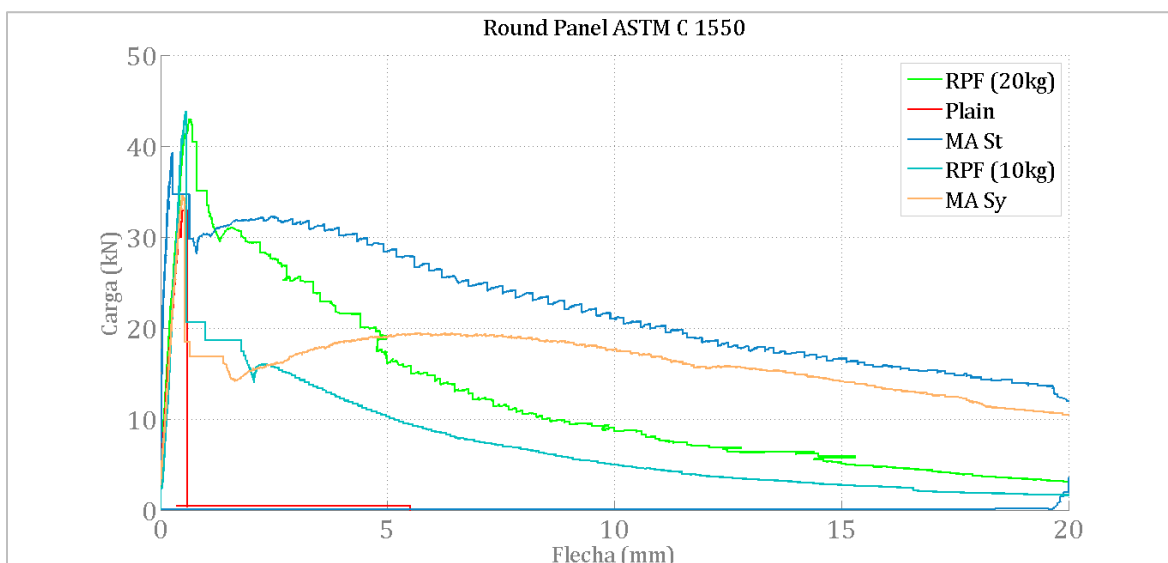


Figura 59. Gráfica de resultados del ensayo de placa circular (RoundPanel).

La Figura 59 muestra las gráficas obtenidas para los hormigones fabricados con las distintas fibras. El hormigón fabricado con Fibra Sintética Reciclada, ha presentado una mejora de comportamiento respecto del hormigón de control, sin embargo, la dosificación de 10kg/m^3 parece insuficiente para el ensayo de Round Panel, no así en cuanto al ensayo de flexotracción donde se obtienen valores que alcanzan los obtenidos con MA Sy. Doblando la dosificación a 20kg/m^3 se consiguen mejores resultados, consiguiendo incluso doblar resistencias post-fisuración respecto a la fibra MA Sy al inicio de la curva.

6.2.4 Conclusiones

Los distintos ensayos mecánicos han mostrado que las fibras sintéticas recicladas pueden llegar a tener comportamiento mecánico cuando se utilizan dosificaciones altas, una posible separación de las fibras por tamaños podría ser interesante para comprobar si se consiguen mejores resultados con las mismas dosificaciones, utilizando fibras que tengan una longitud homogénea.

6.3 Evaluación de retracción

Puesto que el objetivo principal del estudio es el de evaluar los efectos de las fibras sintéticas recicladas sobre la fisuración por retracción del hormigón, se prevé llevar a cabo distintos métodos de ensayo de retracción para verificar la efectividad de las fibras recicladas sobre el control de este fenómeno.

En este caso, se mantiene la decisión de utilizar dosificaciones estándar para las fibras comerciales y se opta por tomar diferentes dosificaciones de fibras sintéticas recicladas, teniendo cuatro hormigones con estas fibras: el primero FSR (1.8kg) con una dosificación del doble de la recomendada para micro-fibras sintéticas comerciales; el segundo corresponderá a 3.6 kg de fibra por m³ de hormigón; el tercero, contiene la misma cantidad de fibras que la macro-fibra sintética (5kg) y en el último hormigón fabricado con este tipo de fibras se dobla este valor. Con esto se pretende comparar el efecto de las fibras sintéticas recicladas con el de los distintos tipos de fibras comerciales, en cuanto a control de retracción.

Todos los ensayos de retracción se han realizado en las mismas condiciones ambientales. (Alrededor de 36° C de temperatura y 30% de humedad) en general son condiciones más agresivas que las utilizadas en normativa o por otros autores. Con esto se pretende emular un ambiente seco y caluroso que aumente la retracción del hormigón.

6.3.1 Retracción plástica

Una vez realizado el ensayo de retracción, se procede al análisis cuantitativo de los resultados obtenidos en el mismo, para determinar si es viable la incorporación de las fibras sintéticas recicladas para el control de este fenómeno. Teniendo en cuenta la reducción de fisura respecto del hormigón control, fabricado sin fibras.

Durante los ensayos de retracción plástica, las condiciones ambientales se mantuvieron estables con valores de temperatura de 35±2°C humedad relativa entre 36 y 63% y una velocidad de viento de entre 4.5 y 8 m/s. La variación en las condiciones de humedad se debe a la climatología exterior y por lo tanto ha sido difícil controlar este parámetro.

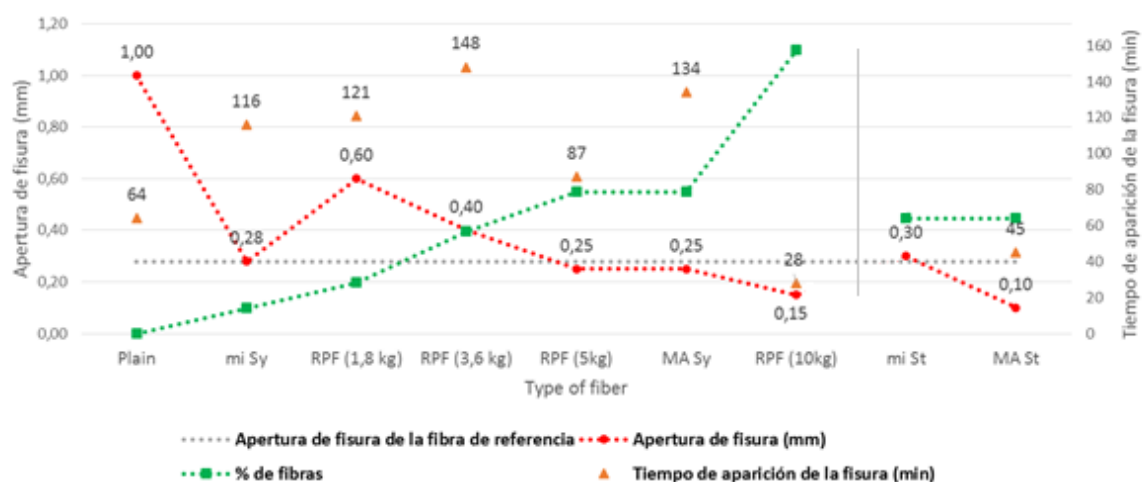


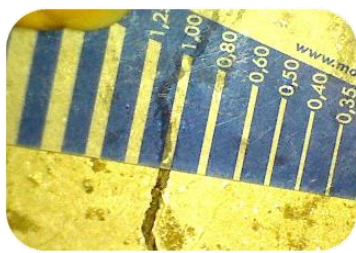
Figura 60. Gráfica de resultados de retracción.

La Figura 60 muestra los resultados de los ensayos de retracción plástica. Se muestran los resultados de los hormigones ordenados de menor a mayor cantidad de fibras, a excepción de las fibras metálicas que se han dejado a la derecha de la gráfica ya que este tipo de fibras no suelen usarse para control de retracción.

A partir de los 5kg/m³ de FSR se alcanzan resultados de apertura de fisura que quedan por debajo del umbral marcado por las fibras sintéticas comerciales para control de retracción plástica. En la Tabla 15 se recogen los resultados numéricos de estos resultados.

Tabla 15. Resultados del ensayo de retracción plástica.

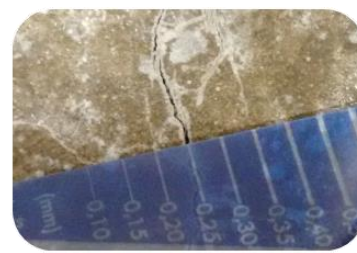
Hormigón	Control	FSR (1,8 kg)	FSR (3,6 kg)	FSR (5kg)	FSR (10kg)	mi Sy	mi St	MASy	MASt
Dosificación (kg/m ³)	0	1,8	3,6	5	10	0,9	35	5	35
% fibras sobre volumen	0	0,2	0,4	0,55	1,11	0,1	0,45	0,55	0,45
Apertura de fisura (mm)	1	0,6	0,4	0,25	0,15	0,28	0,3	0,25	0,1
Tiempo de aparición de la fisura (min)	64	121	148	87	28	116		134	45
Temperatura media (°C)	*31,20	36,7	34,03	34,44	36,3	34,82		36,16	36,33
Humedad media (%)	63,24	36,46	40,74	60,37	60,58	60,02		60,27	60,04
Velocidad de viento (m/s)	7,97	6,87	7,18	5,06	4,52	6,82		4,63	2,4



Control



mi Sy



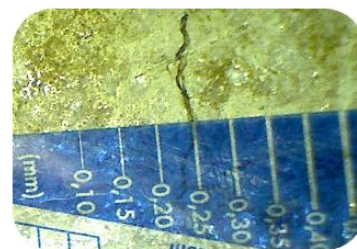
MA Sy



RPF (1.8kg)



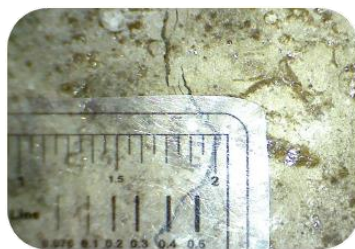
RPF (5kg)



mi St



MA St



RPF (3.6kg)



RPF (10kg)

Figura 61. Apariencia de las fisuras de cada uno de los hormigones fabricados.

En la Figura 61 se puede ver la apariencia mostrada por los hormigones fabricados con los distintos tipos de fibras. Con altas dosificaciones de Fibra reciclada se observan aperturas de fisura similares a las obtenidas con las fibras comerciales.

6.3.2 Anillo restringido

Para el ensayo de anillo restringido se han realizado únicamente ensayos con hormigón de control. Basando el estudio en el que han realizado otros autores y en lo que marca la normativa. Deberían aparecer fisuras en el hormigón a los 7 días.

Para realizar el ensayo se debe desmoldear la probeta al final del fraguado del hormigón por lo que se realizó un ensayo complementario de principio y final de fraguado del hormigón de control que marcó el final del fraguado aproximadamente a las 6h del vertido del hormigón.

Se han realizado varios ensayos en los que se han mantenido todas las condiciones y la aparición de la fisura ha sido inexistente en la mayoría de casos. En los casos en que se ha obtenido fisura la diferencia entre los tiempos de aparición ha sido de varios días o semanas. Por lo que, en este caso, no se ha podido llegar a estudiar el hormigón reforzado con fibra reciclada.

Las diferencias entre edades de aparición de fisura se pueden deber a diversos factores como el compactado de las probetas o el sellado durante las primeras horas.

Las gráficas obtenidas en las galgas extensométricas muestran que el hormigón sí que ejerce presión sobre el anillo metálico.

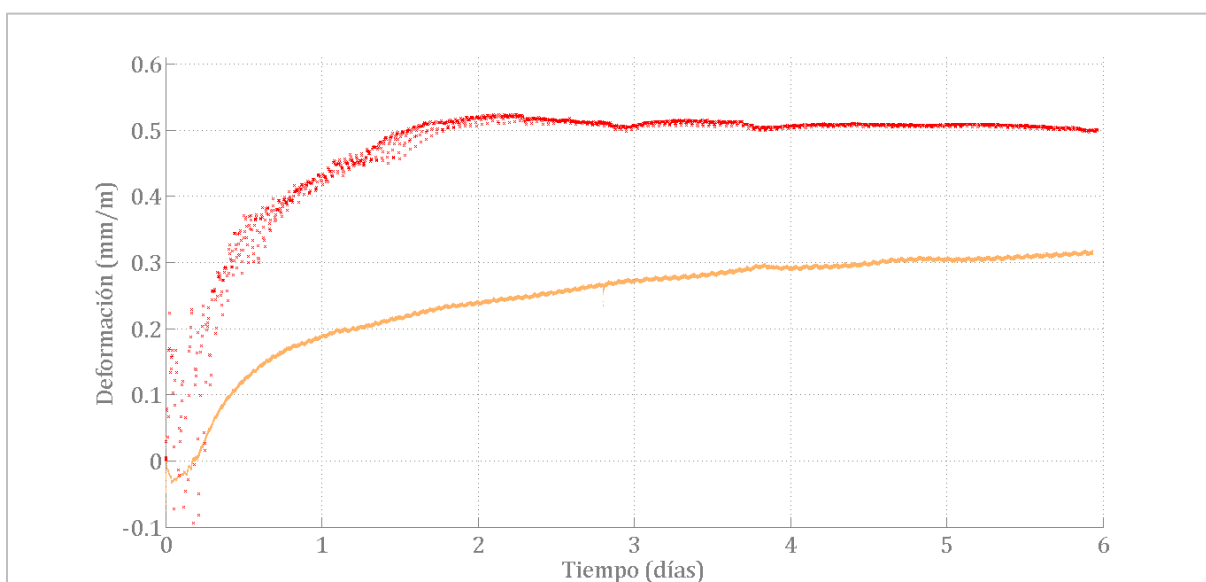


Figura 62. Resultados de deformación durante el ensayo de anillo restringido.



Figura 63. Fisuras aparecidas en los ensayos de anillo restringido.

La Figura 63 muestra que la fisura obtenida en el hormigón control es de entre 0.1 y 0.2 mm lo que es insuficiente para poder realizar una comparativa entre hormigones de distintos tipos.

6.3.3 Retracción libre

Los ensayos de retracción libre han estado sujetos a problemas de disponibilidad del laboratorio por lo que sólo se han podido hacer un número reducido de ensayos al hormigón control y al hormigón con fibra sintética reciclada.

Algunas perturbaciones en los relojes comparadores hacen que sólo se puedan mostrar los resultados de algunas probetas.

El ensayo de retracción libre muestra diferencias significativas entre las probetas selladas y las probetas expuestas al ambiente de la cámara de retracción.

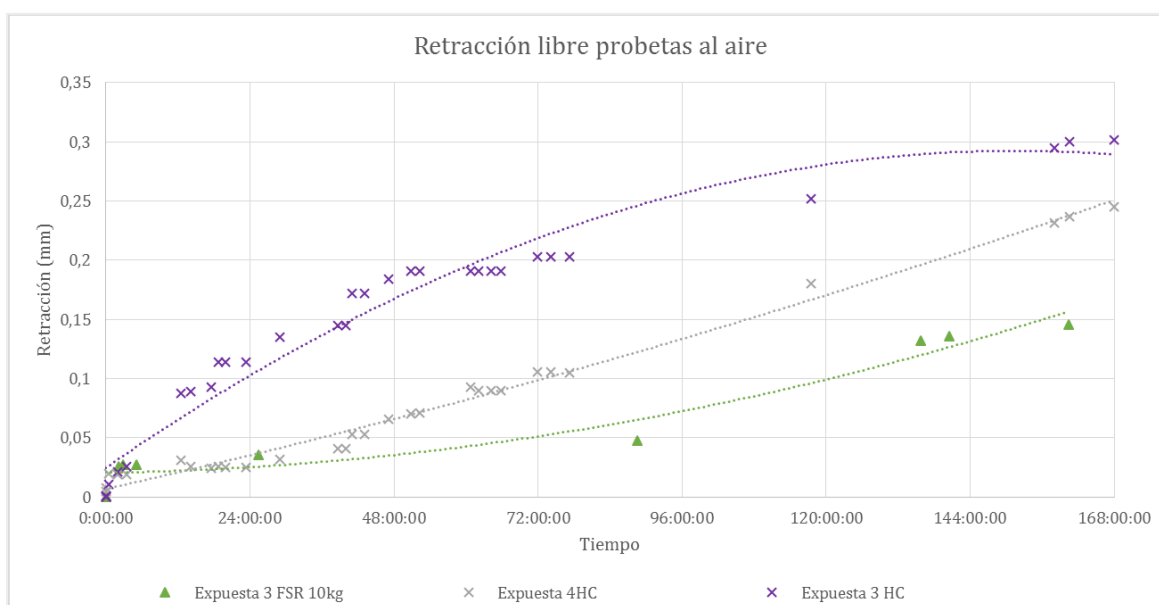


Figura 64. Resultados de retracción libre de las probetas expuestas al ambiente.

En la Figura 65 se puede ver cómo el hormigón de control muestra una mayor retracción que el reforzado con fibras sintéticas recicladas con dosificación de 10kg para las probetas que no han sido selladas. De lo que se puede deducir un efecto de las fibras sintéticas recicladas sobre la retracción. Sin embargo, estos resultados requieren de confirmación por la falta de probetas ensayadas.

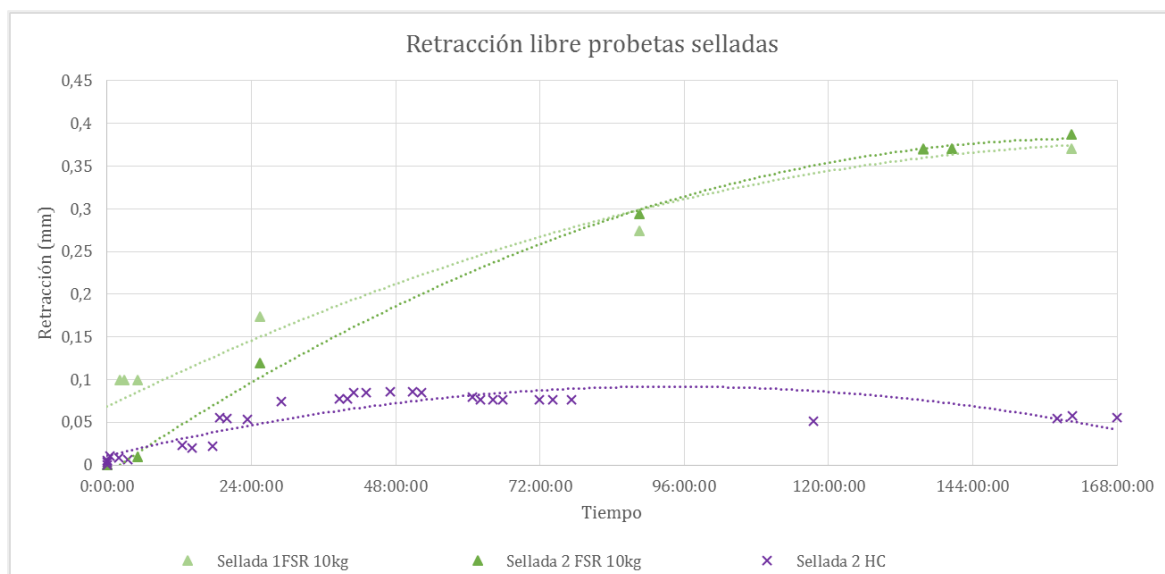


Figura 65. Resultados de retracción libre de las probetas selladas con plástico.

La Figura 65 muestra los resultados obtenidos para las probetas selladas con plástico, en este caso se muestran resultados contrarios a los obtenidos en las probetas expuestas al aire. El hormigón control muestra una reducida retracción, sin embargo los datos parecen ser muy estables desde las primeras 24h, esto significa que se deberían confirmar los resultados realizando más ensayos.

6.3.4 Conclusiones

El ensayo de retracción plástica ha mostrado la efectividad de las fibras recicladas en cuanto al control de fisuración por retracción, mostrando apariencias y aperturas de fisura que han conseguido mejorar las obtenidas con fibras comerciales para control de retracción, cuando se utilizan altas dosificaciones.

En cuanto a los ensayos de retracción libre y anillo restringido no se han conseguido resultados esclarecedores, de modo que queda pendiente la repetición de estos ensayos.

En cuanto al ensayo de anillo restringido se puede decir que su repetibilidad es cuestionable ya que se ha comprobado que para el mismo hormigón control se obtienen resultados muy diferentes.

7 CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

7.1 Conclusiones

- La resistencia a compresión simple de los hormigones no se ve afectada si se incorporan FSR.
- Con una dosificación de 20kg/m^3 de fibras sintéticas recicladas se superan los límites establecidos por la EHE para considerar a las FSR con carácter estructural.
- La influencia que las fibras tienen sobre la consistencia se puede corregir aumentando ligeramente la cantidad aditivo superplastificante en la dosificación.
- En cuanto al comportamiento mecánico, el hormigón fabricado con Fibra Sintética Reciclada, ha presentado una mejora de comportamiento respecto del hormigón de control, sin embargo, la dosificación de 10kg/m^3 parece insuficiente para el ensayo de Round Panel, no así en cuanto al ensayo de flexotracción donde se obtienen valores que alcanzan los obtenidos con fibras comerciales. Doblando la dosificación a 20kg/m^3 se consiguen mejores resultados, consiguiendo incluso doblar resistencias post-fisuración respecto a las fibras comerciales al inicio de la curva.
- El ensayo de round panel es un ensayo que se lleva a cabo con precisión, por lo que los valores obtenidos son fiables. En éste, se obtienen resultados optimistas en una alta dosificación para las fibras que se quieren caracterizar.
- Después de la rotura de las probetas se ha observado una posible falta de adherencia. Esto es otro factor que puede haber influido negativamente en los

resultados obtenidos. Una posible solución sería la de aplicar un tratamiento posterior al triturado que aporte mayor adherencia a las fibras y aporten mayores resultados mecánicos.

- Los resultados obtenidos en los ensayos de retracción aportan resultados prometedores con altas dosificaciones. A partir de la dosificación de 5 kg/m^3 se consiguen reducciones de fisura del 75% respecto del hormigón de control. Cabe señalar que las fibras sintéticas comerciales para el control de retracción no tienen carácter mecánico.

7.2 Futuras líneas de investigación

En este estudio queda pendiente realizar los ensayos de retracción libre previstos caracterizar mejor el efecto sobre la retracción y realizar una comparativa entre los distintos tipos de ensayo.

Las fibras tienen una superficie lisa, las fibras estructurales sintéticas comerciales suelen presentar superficies rugosas para garantizar la adherencia. Se podrían plantear estudios de arrancamiento de las fibras para determinar la adherencia de las mismas. En esta línea, se puede proponer un tratamiento de adherencia antes del triturado de las sacas.

Como estudios complementarios, se podría realizar una separación por tamaños de las fibras recicladas para comprobar el efecto que ejercen sobre el hormigón las fibras equivalentes a micro-fibras comerciales y las equivalentes a macro-fibras ya que se puede hacer una hipótesis de que la misma cantidad de fibras recicladas que sólo contengan tamaños a partir de los 30mm pueden presentar mejores resultados que los obtenidos sin separar las fibras por tamaños.

REFERENCIAS

- [1] ACI Committee 544, «State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete,» 2002.
- [2] I. Marković, High-performance Hybrid-fibre Concrete: Development and Utilisation., 2006.
- [3] Maccaferri, *Fibras como Elemento Estructural para el Refuerzo del Hormigón. Manual Técnico.*
- [4] Plastics Europe, *Plastics. The Facts 2014/2015. An Analysis of European Latest Plastics Production, Demand and Waste Data.*, 2015.
- [5] S. Yin, R. Tuladhar, J. Riella, D. Chung, T. Collister, M. Combe y N. Sivakugan, «Comparative evaluation of virgin and recycled polypropylene fibre reinforced concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 114, pp. 134-141, 2016.
- [6] S. Yin, R. Tuladhar, T. Collister, M. Combe, N. Sivakugan y Z. Deng, «Post-cracking performance of recycled polypropylene fibre in concrete,» *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 1069-1067, 2015.
- [7] D. Foti, «Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete.,» *Composite Structures*, vol. 96, pp. 396-404, 2013.
- [8] Grupo Español del hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón: guía de diseño CEB. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1996.
- [9] C. Videla y C. Aguilar, «Análisis Del Impacto De Los Parametros De Dosificación En La Retracción Hidráulica De Hormigones,» *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 15, nº 2, pp. 102-112, 2011.

- [10] Ministerio de fomento, *Instrucción de hormigón estructural EHE 08*, 2008.
- [11] E. Boghossian y L. D. Wegner, «Use of flax fibres to reduce plastic shrinkage cracking in concrete,» *Cement and Concrete Composites*, nº 30.10, pp. 929-937, 2008.
- [12] D. Snoeck, O. Jensen y N. De Belie, «The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials,» vol. 74, pp. 59-67, 2015.
- [13] D. Snoeck, O. Jensen y N. De Belie, «The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials,» *Cement and Concrete Research*, pp. 59-67, 2015.
- [14] E. Rozière, J. Saliba, F. Grondin y A. Loukili, «Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage,» *Cement & Concrete composites*, vol. 33, pp. 209-217, 2011.
- [15] J. Mora-Ruacho, R. Gettu y A. Aguado, «Influence of shrinkage-reducing admixtures on the reduction of plastic shrinkage cracking in concrete,» *Cement and Concrete Research*, nº 39.3, pp. 141-146, 2009.
- [16] J. Jasiczak, P. Szymański y P. Nowotarsk, «Computerised evaluation of the early age of shrinkage in concrete,» *Automation in Construction*, vol. 49, pp. 40-50, 2015.
- [17] P. Kraai, «Proposed field test for drying shrinkage of concrete,» *CONCRETE CONSTRUCTION*, vol. 29, nº 7, pp. 663-665, 1984.
- [18] P. Kraai, «A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete.,» *Concrete construction*, vol. 30, nº 9, pp. 775-778, 1985.
- [19] A. Paillere y J. Serrano, «Effect of fiber addition on the autogenous shrinkage of silica fume,» *Materials Journal*, vol. 86, nº 2, pp. 139-144, 1989.
- [20] M. Grzybowski y S. Surendra P, «Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete.,» *ACI Materials Journal*, vol. 87, nº 2, pp. 138-148, 1990.
- [21] ASTM C 1581/C 1581 M - 09 a, *Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage*, 2009.

- [22] J. Mora Serrano, A. Aguado de Cea y R. Gettu, «Influencia de los aditivos reductores de retracción sobre la retracción plástica,» 2003.
- [23] ASTM C 1579 - 06, *Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete (Using a Steel Form Insert)*, 2006.
- [24] A. Mazzoli, S. Monosi y E. E. Plescia, «Evaluation of the early-age-shrinkage of Fiber Reinforced Concrete (FRC) using image analysis methods,» *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 596-601, 2015.
- [25] AENOR, *UNE - EN 14651: 2007 + A1 Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual)*, 2008.
- [26] A. M. Brandt, J. Olek y I. H. Marshall, «Round Panel Vs. Beam Tests Toward A Comprehensive And Harmonic Characterization Of Frc Materials,» *Brittle Matrix Composites*, nº 9, p. 23, 2009.
- [27] D. Foti, «Impact behavior of structural elements in concrete reinforced with PET grids,» *Mechanics Research Communications*, 2014.
- [28] D. Foti, «Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers.,» *Construction and building materials*, vol. 25, nº 4, pp. 1906-1915, 2011.
- [29] N. Pešić, . S. Živanović, R. García y P. Papastergiou, «Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres,» *Construction and Building Materials*, vol. 115, pp. 362--370, 2016.
- [30] G. Groli, A. Pérez Caldentey y A. Giraldo Soto, «Cracking performance of concrete reinforced with recycled fibres. An experimental Study,» 2010.
- [31] ASTM C 1550 - 08, *Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel)*, 2008.
- [32] ASTM C 1609 / C 1609 M, *Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber - Reinforced Concrete (Using Beam With Third - Point Loading)*, 2010.
- [33] F. Fraternali, . C. Vincenzo, C. Rosaria , R. Gianvittorio , F. Luciano y I. Loredana, «Experimental study of the thermo-mechanical properties of recycled PET fiber-reinforced concrete,» *Composite Structures*, vol. 93, nº 9, pp. 2368-2374, 2011.

- [34] Y. Akkaya, O. Chengsheng y P. Surendra, «Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete.,» *Cement and Concrete Composites*, nº 29.2, pp. 117-123, 2007.
- [35] T. Aly y J. G. Sanjayan, «Shrinkage-cracking behavior of OPC-fiber concrete at early-age,» *Materials and Structures*, nº 43.6, pp. 755-764, 2010.
- [36] N. P. Banthia, M. F. Majdzadeh, V. S. Bindiganavile y J. Wu, «Fiber synergy in Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC) in flexure and direct shear.,» *Cement and Concrete Composites*, nº 48, pp. 91-97, 2014.
- [37] AENOR, *UNE - EN 12350 - 2 Ensayos de hormigón fresco. Parte 2: Ensayo de asentamiento*, 2009.
- [38] AENOR, *UNE - EN 12390 - 3 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas*, 2009.
- [39] S. P. Shah, M. E. Krguller y . M. Sarigaphuti, «Effects of shrinkage-reducing admixtures on restrained shrinkage cracking of concrete.,» *ACI Materials Journal*, nº 89.3, 1992.
- [40] A. Sivakumar y M. Santhanam., «A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete,» *Cement and concrete composites*, nº 29.7, pp. 575-581, 2007.
- [41] K. Pilakoutas, K. Neocleous y H. Tlemat, «Reuse of tyre steel fibres as concrete reinforcement.,» *Proceedings of the ICE-Engineering Sustainability*, vol. 157, nº 3, pp. 131-138, 2004.
- [42] K. Pilakoutas y R. Strube, «Re-use of Tyres Fibres in Concrete.,» de *Proceedings of the International Symposium on Recycling and Reuse of Used Tyres*, Thomas Telford, University of Dundee, Dundee, UK, 2001.
- [43] D. P. Bentz, M. R. Geiker y K. Kielsg, «Shrinkage-reducing admixtures and early-age desiccation in cement pastes and mortars,» *Cement and Concrete Research*, nº 31.7, pp. 1075-1085, 2001.
- [44] M. J. Oliveira y A. Bettencourt Ribeiro , «Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to control autogenous shrinkage in self-compacting concrete,» *Construction and Building Materials*, nº 52, pp. 267-275, 2014.

- [45] P. Fernando, A. Barros, H. Lebre la Rovere y R. Caldas de Andrade Pinto, «Effect of the addition of synthetic fibers to concrete thin slabs on plastic shrinkage cracking,» *Construction and building materials*, nº 24.11, pp. 2171-2176, 2010.
- [46] N. Banthia y G. Rishi, «Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete,» *Cement and Concrete Research*, nº 36.7, pp. 1263-1267, 2006.
- [47] K. Neocleous, H. Tlemat y K. Pilakoutas, «Design issues for concrete reinforced with steel fibers, including fibers recovered from used tires,» *Materials in civil engineering*, vol. 18, nº 5, 2006.
- [48] K. Folliard y N. Berke, «Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture,» *Cement and Concrete Research*, nº 27.9, pp. 1357-1364, 1997.

ANEJOS

7.3 Datos individuales de los ensayos de compresión y Flexotracción.

7.3.1 Caracterización mecánica

Resultados resistencia a compresión simple de las probetas fabricadas durante la campaña de caracterización mecánica.

	Control		MA Sy		MA St		FSR (10kg)		FSR (10kg)	
	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d	7d	28d
A1a	26,1	33,8	27,858	30,8	28,6	34,7	28,3	31,77	29,75	25,46
A1b	26,6	34,4	28	30,8	27,2	34,9	28,3	36,083	28,39	33,56
A2a	23,6	29,1	27,068	30,5	26,9	32,7	28,8	-	31,602	37,2
A2b	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37,735
A3a	29,7	35,2	-	-	-	-	28,8	-	-	-
A3b	-	35,5	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 66. Resultados de compresión simple de las probetas de la campaña de caracterización mecánica.

7.3.1.1 Ensayo de Flexotracción a 3 puntos con entalla



Figura 67. Gráfica de resultados de las probetas de control de ensayo de flexotracción a 3 puntos.

Tabla 16. Resultados de las probetas de control de ensayo de flexotracción a 3 puntos

Control	LOP (MPa)	f_{r1} (MPa)	f_{r2} (MPa)	f_{r3} (MPa)	f_{r4} (MPa)
A1a	2.96	0	0	0	0
A1b	2.82	0	0	0	0
A2	3.18	0	0	0	0
Media	2.99	0.	0	0	0

En el hormigón de control aparece una resistencia residual, al contrario de lo que cabría esperar, esto se puede deber al tipo de ensayo, por lo que se descarta.

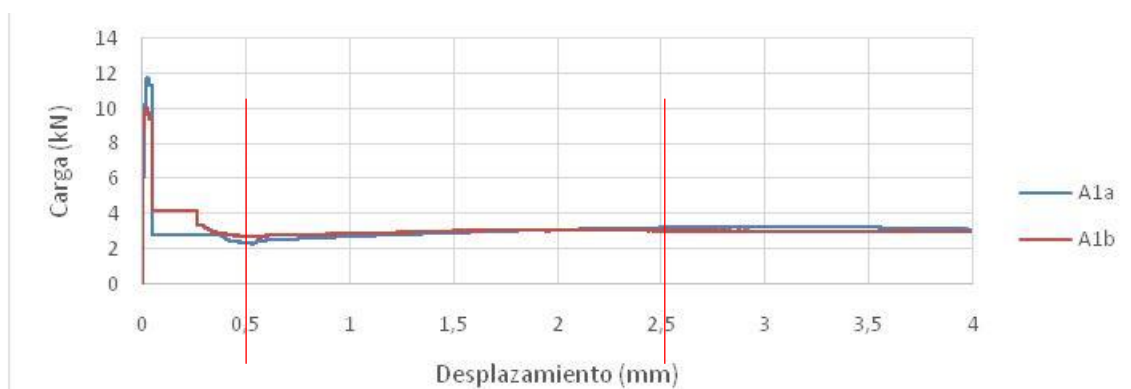


Figura 68. Gráfica de resultados de las probetas de MA Sy de ensayo de flexotracción a 3 puntos.

Tabla 17. Resultados de las probetas de MA Sy de ensayo de flexotracción a 3 puntos

MA Sy	LOP (MPa)	f_{r1} (MPa)	f_{r2} (MPa)	f_{r3} (MPa)	f_{r4} (MPa)
A1a	3.77	0.77	0.94	1.04	1.05
A1b	3.21	0.88	0.97	0.98	0.96
A2	3.26	1.31	1.73	1.91	1.99
Media	3.41	0.82	0.95	1.01	1.33
Rango	16%	66%	83%	92%	77%

Las fibras sintéticas estructurales, presentan una ligera curva de recuperación de resistencia después de la rotura, dando lugar a una rotura dúctil. El rango de los resultados obtenidos es muy alto para las resistencias posteriores a la primera fisura esto se debe, en este caso a los valores obtenidos para la amasada 2 que son muy superiores al resto.

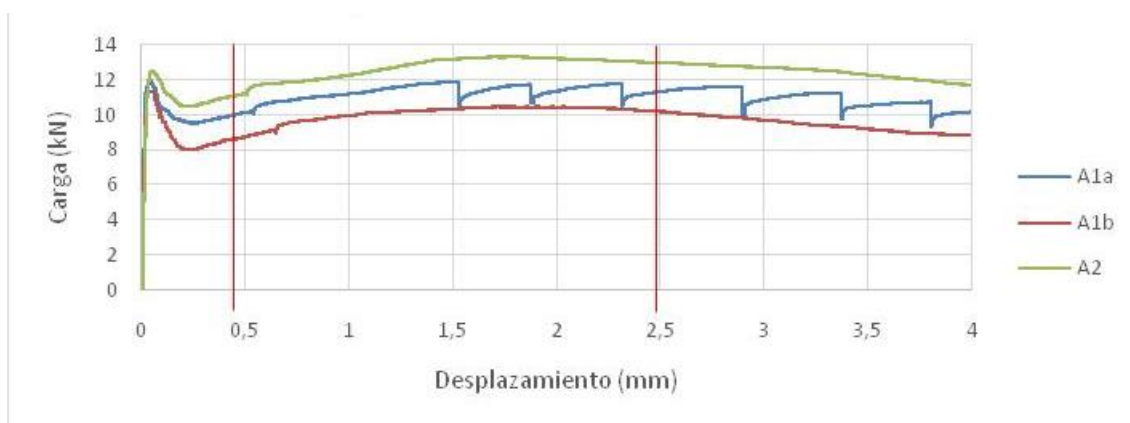


Figura 69. Gráfica de resultados de las probetas de MA St de ensayo de flexotracción a 3 puntos.

Tabla 18. Resultados de las probetas de MA St de ensayo de flexotracción a 3 puntos.

MA St	LOP (MPa)	f_{r1} (MPa)	f_{r2} (MPa)	f_{r3} (MPa)	f_{r4} (MPa)
A1a	3.83	3.24	3.80	3.62	3.37
A1b	3.64	2.80	3.31	3.26	2.94
A2	4.26	3.59	4.22	4.15	3.92
Media	3.91	3.02	3.55	3.44	3.16
Rango	16%	26%	26%	26%	31%

Las fibras metálicas tienen muy buen comportamiento, como se puede apreciar en la gráfica, tras la rotura de la probeta se observa una importante recuperación gracias a la resistencia de las fibras metálicas que en algunos casos ha llegado a superar la carga de primera fisura.

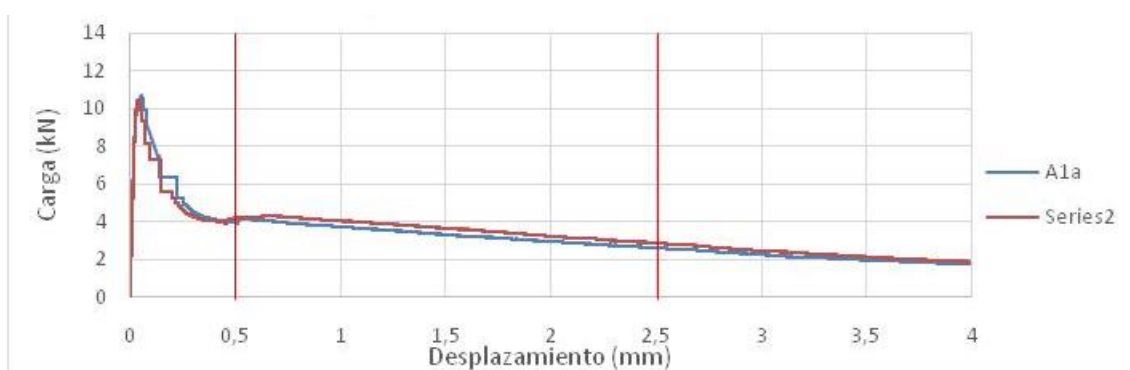


Figura 70. Gráfica de resultados de las probetas de FSR (10kg) de ensayo de flexotracción a 3 puntos.

Tabla 19. Resultados de las probetas de FSR (10kg) de ensayo de flexotracción a 3 puntos.

FSR (10kg)	LOP (MPa)	f _{r1} (MPa)	f _{r2} (MPa)	f _{r3} (MPa)	f _{r4} (MPa)
A1a	3.41	1.28	1.05	0.84	0.63
A1b	3.34	1.34	1.16	0.91	0.68
Media	3.38	1.31	1.11	0.87	0.65
Rango	2%	4%	9%	8%	8%

En cuanto a las fibras sintéticas recicladas con dosificación de 10kg/m³ de hormigón, se ve una pequeña recuperación después de los 0.5mm de desplazamiento y con un inmediato declive. En una rama a resistencias muy bajas.

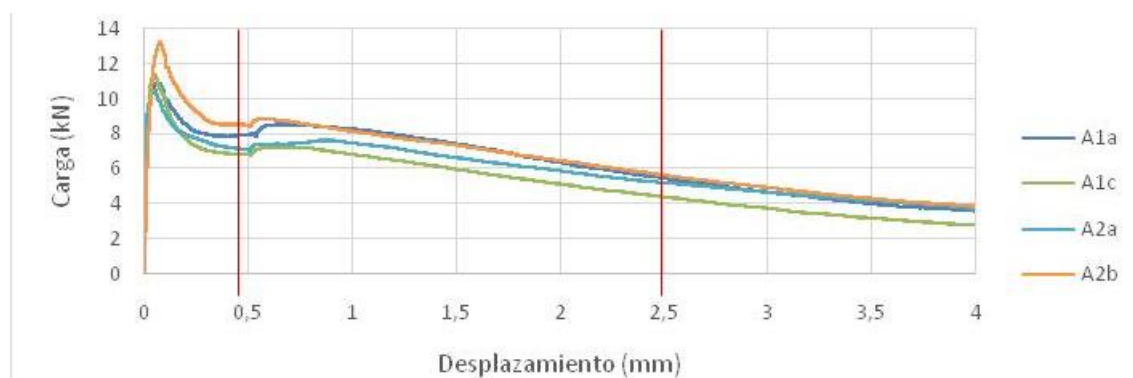


Figura 71. Gráfica de resultados de las probetas de FSR (20kg) de ensayo de flexotracción a 3 puntos.

Tabla 20. Resultados de las probetas de FSR (20kg) de ensayo de flexotracción a 3 puntos.

FSR (20kg)	LOP (MPa)	f _{r1} (MPa)	f _{r2} (MPa)	f _{r3} (MPa)	f _{r4} (MPa)
A1a	3.49	2.55	2.38	1.75	1.28
A1b	3.64	2.52	2.64	2.02	1.48
A1c	3.65	2.18	1.91	1.41	1.01
A2a	3.37	2.27	2.13	1.67	1.34
A2b	4.25	2.72	2.35	1.80	1.37
Media	3.67	2.45	2.28	1.73	1.30
Rango	24%	22%	32%	35%	36%

Con una dosificación de 20kg/m³ se observa un mejor comportamiento de las fibras sintéticas recicladas. La recuperación después de los 0.5 mm es mayor y la rama de descenso tiene un transcurso parecido pero a cargas mayores.

7.3.1.2 Ensayo de Flexotracción a 4 puntos

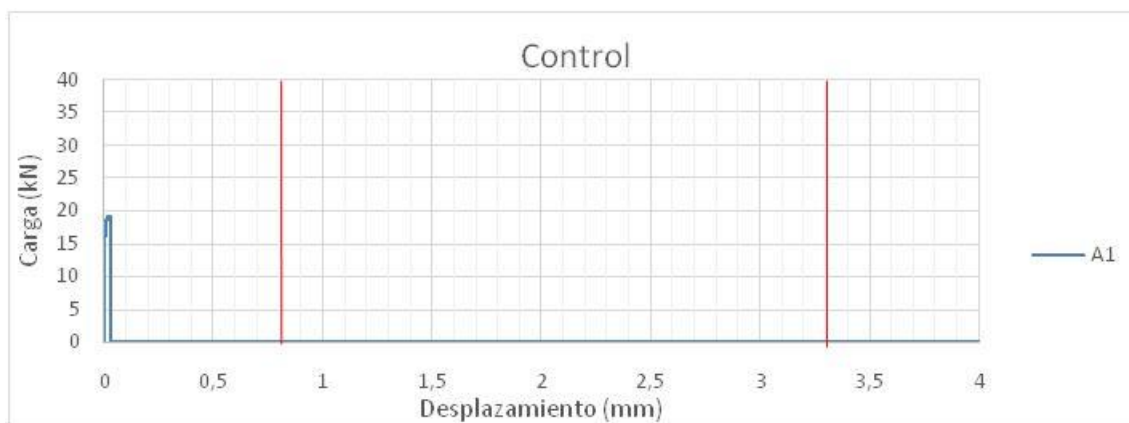


Figura 72. Gráfica de resultados de las probetas de control de ensayo de flexotracción a 4 puntos.

Tabla 21. Resultados de las probetas de control de ensayo de flexotracción a 4 puntos.

Control	f_1 (MPa)	f_p (MPa)	f_{600^D} (MPa)	f_{150^D} (MPa)
A1	2.84	2.84	0	0

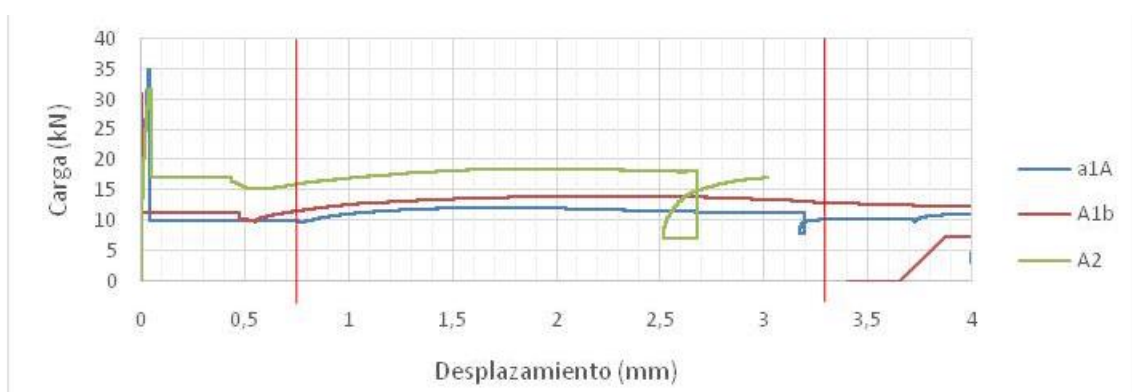


Figura 73. Gráfica de resultados de las probetas de MA St de ensayo de flexotracción a 4 puntos.

Tabla 22. Resultados de las probetas de MA Sy de ensayo de flexotracción a 4 puntos.

MA Sy	f_1 (MPa)	f_p (MPa)	f_{600^D} (MPa)	f_{150^D} (MPa)
A1a	5.19	5.19	1.51	1.65
A1b	4.59	4.59	1.77	1.91
A2	4.71	4.71	2.43	2.52
Media	4.83	4.83	1.90	2.03
Rango	12%	12%	48%	43%

En el ensayo de 4 puntos, se ve una recuperación del hormigón reforzado con MA Sy similar a la observada en el ensayo de 3 puntos.

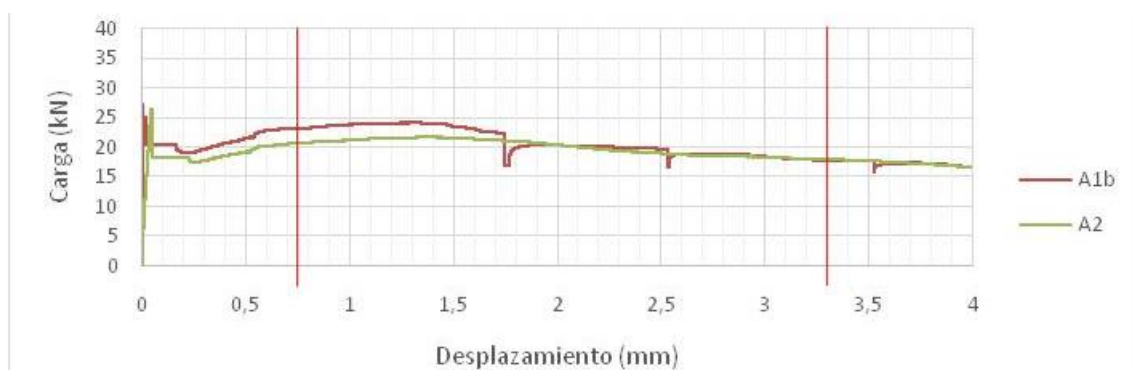


Figura 74. Gráfica de resultados de las probetas de MA St de ensayo de flexotracción a 4 puntos.

Tabla 23. Resultados de las probetas de MA St de ensayo de flexotracción a 4 puntos.

MA St	f_1 (MPa)	f_p (MPa)	f_{600}^D (MPa)	f_{150}^D (MPa)
A1b	4.01	4.01	3.46	2.63
A2	3.92	3.92	3.10	2.66
Media	3.97	3.97	3.28	2.65
Rango	2%	2%	10%	1%

El ensayo de 4 puntos para las probetas de MA St presenta una curva que recupera resistencias después de la fisuración y después muestra una pérdida de resistencias.

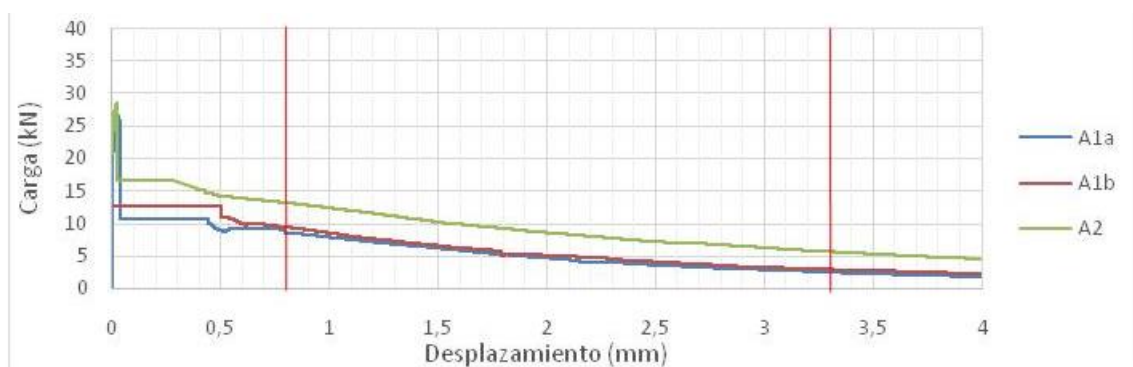


Figura 75. Gráfica de resultados de las probetas de FSR (10kg) de ensayo de flexotracción a 4 puntos.

Tabla 24. Resultados de las probetas de FSR (10kg) de ensayo de flexotracción a 4 puntos.

FSR (10kg)	f_1 (MPa)	f_p (MPa)	f_{600}^D (MPa)	f_{150}^D (MPa)
A1a	3.93	3.93	1.26	0.36
A1b	4.46	4.46	1.38	0.42
A2b	4.21	4.21	1.94	0.82
Media	4.20	4.20	1.53	0.53
Rango	12%	12%	44%	87%

Para FSR I ambos ensayos han dado curvas muy similares, llevando un descenso continuo después de la rotura.

