



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
Escuela Técnica Superior en Ingeniería de la
Edificación Proyecto Final de Grado

Alumna: Dusami Villalón Octavio
Directores: Ricardo Perelló
Giocomo Moriconi

Curso 2011-2012

Análisis Experimental del comportamiento del hormigón Reforzado con fibras de acero

“ En esta breve reseña me gustaría agradecer a mis tutores Giocomo Moriconi y Ricardo Perelló por la ayuda que me han aportado a la hora de realizar esta tesis, a Roberto Técnico del laboratorio de estructura y material de la universidad Delle marche, ya que ha tenido mucha paciencia conmigo. Por otro lado agradecer a todos los profesores que me han impartido asignaturas y me han aportado sabiduría y formas de afrontar la profesión. Y también ,claramente a mis compañeros y amigos que e compartido estos 5 años de carrera y que me han aportado muchos momentos buenos y de risas, y por último a mi familia que siempre ha estado a mi lado apoyándome en todo lo que he decidido hacer. “

Un cordial saludo

Dusami

Resumen

Análisis experimental del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar la influencia de la incorporación de fibras de acero en hormigones, en las propiedades mecánicas del hormigón endurecido.

En la investigación se han realizado 4 tipos de mezclas cada una de ellas con distintos porcentajes de fibras de acero, para poder observar los distintos comportamientos entre ellas según los ensayos de compresión, tracción indirecta y flexión realizados.

Se pudo observar que a mayor cantidad de fibra adicionada menos es la trabajabilidad del hormigón.

En el hormigón endurecido se logró determinar que la adición de fibras de acero aumenta un poco la resistencia a compresión del hormigón pero no tiene mayor influencia, y que por el contrario, el aumento de la cantidad de fibra de acero presente en la mezcla si tiene influencia en la resistencia a flexión y tracción, en este caso las aumenta considerablemente.

ÍNDICE

Introducción

CAPITULO 1: HORMIGÓN FIBROREFORZADO

1.1. Historia	3
1.2. Definición hormigón reforzado con fibras	6
1.3. Tipificación del hormigón	9
1.4. Tipos de fibras y características	10
1.4.1. Fibras de vidrio	11
1.4.2. Fibras de polipropileno	13
1.4.3. Fibras de acero	14
1.5. Conceptos generales del comportamiento Mecánico de materiales reforzados con fibras	16
1.6. Comportamiento en estado fresco de SFRC	19
1.7. Comportamiento al estado endurecido de SFRC	21
1.8. Normativa Española e Italiana	23

CAPÍTULO 2: HORMIGONES CON FIBRAS DE ACERO

2.1. Definición	25
2.2. Componentes del SFRC	25
2.2.1 Cemento	
2.2.2 Agua	
2.2.3 Áridos	
2.2.4 Aditivos	
2.2.5 Adiciones	
2.2.6 Fibras de acero.....	28
- Definición	
- Valor mínimo de la resistencia	
- Características geométricas	
- Longitudes	
- Longitud crítica	
2.3. Elaboración del SFRC	36
2.3.1 Amasado	
2.3.2 Consistencia	
2.3.3 Puesta en Obra	
2.3.4 Compactación	
2.3.5 Curado	
2.4. Características mecánicas	40
2.4.1 Resistencia a Compresión	
2.4.2 Módulo de Deformación	
2.4.3 Resistencia a Tracción	
2.4.4 Resistencia a Flexión	
2.5. Aplicaciones del Hormigón Reforzado con Fibras de Acero	46

CAPÍTULO 3: ANÁLISI EXPERIMENTAL

3.1 General	48
3.2 Material utilizado	49
3.3 Dosificación del hormigón utilizado	50
3.4 Calculo Bolomey	55
3.5 Seguimiento de la Elaboración del hormigón en Laboratorio.....	58
Calendario	
Preparación Hormigón	
Cono de Abrams	
Vibrado de Probetas	
3.6 Ensayo de compresión	63
3.7 Ensayo de flexión	67
3.8 Ensayo de tracción	75
3.9 Conclusión	79
4.0 Bibliografía	81

INTRODUCCIÓN:

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción, pues ofrece una serie de ventajas que lo hacen muy atractivo. El hormigón es un material que toma casi cualquier forma deseada, posee una alta resistencia a compresión, monolitismo, relativa facilidad de obtención de sus componentes, es relativamente económico.

Dentro de las desventajas que presenta el material, está principalmente su baja resistencia a tracción (respecto de la de compresión es aproximadamente de 1:10), generando comportamientos frágiles en su estado no reforzado. La resistencia de diseño a tracción del hormigón es generalmente considerada como cero, por lo que cuando se tienen tensiones de tracción en el hormigón se debe disponer de algún mecanismo de refuerzo (usualmente acero en barras, fibras, mallas).

La técnica de mezclar fibras con materiales frágiles para reforzarlos no es algo novedoso, ni que requiera imprescindiblemente de procedimientos sofisticados para su utilización. Se conocen construcciones con miles de años de antigüedad realizadas con técnicas similares, y en la actualidad en lugares aislados y con bajos recursos económicos se continúa construyendo con materiales como barro, paja, estiércol de animales, entre otros.

Los materiales compuestos reforzados con fibras están constituidos por unas fibras embebidas o ancladas en una matriz generando una interfase entre las partes (fibras y matriz). En este esquema, las fibras y la matriz mantienen sus características físicas y mecánicas, produciendo una combinación de propiedades que no podrían ser alcanzadas con cada uno de los constituyentes por separado. En general, las fibras son las que asumen las tensiones de tracción mientras que la matriz que las rodea mantiene su localización y orientación, actuando como un medio de transferencia de carga entre ellas, además de proteger a las fibras de los agentes agresivos del medio ambiente como la humedad y la temperatura, entre otros.

CAPITULO 1

HORMIGÓN FIBROREFORZADO

1.1_HISTORIA

Las fibras para reforzar elementos se han utilizado desde la antigüedad. Históricamente los pelos de caballo se utilizaban en el mortero y la paja en ladrillos de barro.



Figura 1.1.1. Ladrillos de barro reforzados con paja.

El hormigón ha experimentado una profunda evolución como material de construcción durante el s.XX a todos los niveles: de diseño, de cálculo, tecnológico y propiamente como material; buscando siempre mejoras en sus propiedades y comportamiento.

Un ejemplo de ello es la aparición del hormigón armado (o reforzado) en la segunda mitad del s.XIX. Su descubrimiento fue atribuido a Lamblot por la presentación en la exposición Universal de París de 1855 un barco de carcasa metálica recubierto por hormigón de cal hidráulica. (Figura 1.1.2)

Sin embargo fue Monet, un jardinero de Versalles, quien en 1868 patentó el sistema para la realización de macetas y macetones, depósitos y losas. Desde entonces, numerosas han sido las investigaciones y estudios llevados a cabo con el objetivo de mejorar el comportamiento del hormigón. Durante el s.XX se han desarrollado tecnologías como la del hormigón pretensado y el hormigón proyectado, y han aparecido hormigones llamados “especiales”: hormigones de alta resistencia, hormigones ligeros, hormigones pesados, hormigones porosos, hormigones autocompactables, hormigones reciclados y, también, el hormigón reforzado con fibras.



Figura 1.1.2. Barco de carcasa metálica recubierto por hormigón de cal hidráulica

En 1911 fue la primera vez que se utilizó fibras de acero para incrementar la resistencia y estabilidad del hormigón armado convencional por Graham. Sin embargo, los primeros estudios científicos sobre este tema se deben a Griffith, en 1920, a los que siguieron en 1963 los de Romualdi y Batson, Romualdi y Mandel.

Desde la llegada de la fibra como refuerzo para el hormigón en la década de 1940, una gran cantidad de pruebas se han realizado en los distintos materiales fibrosos para determinar las características reales y las ventajas de cada producto.

El hormigón de cemento Portland se considera que es un material relativamente frágil, cuando es sometido a tracción el hormigón se fisura. Desde mediados de 1800 el acero como refuerzo se ha utilizado para superar este problema. Como un sistema compuesto, el acero de refuerzo se supone que puede llevar todas las cargas de tracción. Cuando la fibra de refuerzo se agrega a la mezcla de hormigón, también puede aumentar la capacidad de carga de tracción del sistema compuesto. De hecho, las investigaciones han demostrado que la resistencia a la rotura del hormigón se puede aumentar hasta 5 veces por la adición de fibra de refuerzo.

Durante la segunda mitad del siglo XIX surgen las primeras patentes de elementos de hormigón reforzados con armaduras de acero. En el año 1918 H. Alfesen patentó un proceso para aumentar la resistencia del hormigón a tracción utilizando fibras pequeñas (Hannant, 1978). Partiendo de un material como el cemento Portland y por consiguiente de morteros y hormigones, se combina con un sistema de refuerzo discreto como lo son las fibras y se obtiene el Hormigón Reforzado con Fibras de Acero (SFRC).

En la década de 1960, el acero, el vidrio (GFRC), y las fibras sintéticas, como las fibras de polipropileno, se utilizaban para el refuerzo del hormigón.

Las principales propiedades que influyen en la resistencia y durabilidad de un hormigón reforzado con fibras son:

- El tipo de fibras utilizadas.
- Volumen en tanto por ciento de fibra.
- Relación de aspecto (la longitud de una fibra dividida por su diámetro).
- Orientación de las fibras en la matriz.

La fibra de vidrio de refuerzo ha demostrado el mayor desarrollo en los últimos 25 años. En un principio, las fibras de vidrio no tuvieron éxito porque el álcali del cemento portland las atacaban y destruían.

En 1967 el Dr. AJMajumdar, del Reino Unido Establecimiento Building Research, evaluó el uso de vidrio que contiene óxido de circonio. Es a partir de este momento, cuando el refuerzo con fibras de vidrio resistentes al álcalis, se desarrollaron.

Además de sus propiedades estructurales, el GRC se utiliza a menudo como un producto de acabado arquitectónico. Cuando se hace esto, es muy importante controlar su aspecto final, los métodos para la producción de productos de GRC son, por tanto, fundamentales.

Los SFRC han sido ampliamente estudiados en relación a sus propiedades mecánicas como la tenacidad, la resistencia y el comportamiento a cargas instantáneas después de fisurado, la resistencia a la fisuración por retracción, el comportamiento a los ciclos hielo-deshielo, entre otros.

1.2. DEFINICIÓN DE HORMIGÓN FIBROREFORZADO.

El hormigón es uno de los materiales más usados en la construcción, pero a pesar de su increíble resistencia a compresión, no resiste esfuerzos a tracción. Desde mediados del siglo XX se han venido estudiando los hormigones con fibras.

El hormigón reforzado con fibras de acero (Fiber Reinforced concretas – FRC) resulta ser un material compuesto, constituido por una matriz cementante y por un refuerzo de fibras, será definido por las CNR DT 204 (normativa italiana) y el anejo 14 de la EHE-08 (normativa española), instrucciones para el diseño, la ejecución y el control de estructuras de hormigón fibroreforzado.

Según el Anejo 14 de la Instrucción española EHE-08, son hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, en proporción menor del 1,5% en volumen. Para mejorar el débil comportamiento en tracción (flexotracción) que presenta el hormigón en masa.

Las fibras soportan esfuerzos de tracción que transmiten por adherencia al hormigón, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez que mejoran la tenacidad. El siguiente gráfico presenta el comportamiento conceptual carga-abertura de fisura de un ensayo a flexión en matrices con y sin fibras:

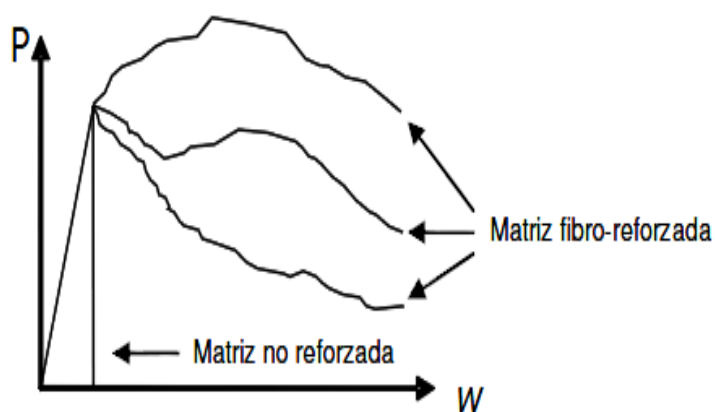


Figura.1.1 Curvas típicas carga-abertura de fisura, para matrices con y sin fibras.

A continuación se observan dos gráficas comparativas, la primera se trata de un hormigón tradicional y hormigón en masa, la segunda gráfica se trata de hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, para mejorar el débil comportamiento en tracción (flexotracción) que presenta el hormigón en masa.

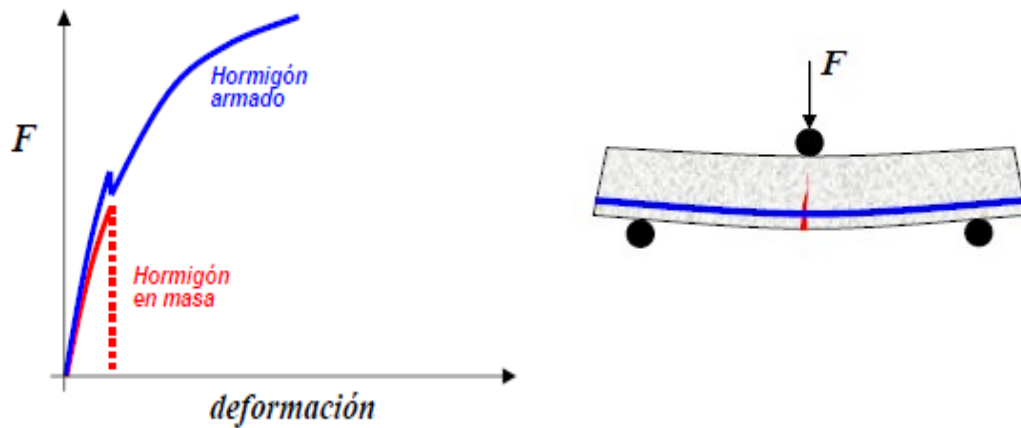


Figura.1.2. Comportamiento del Hormigón armado y Hormigón en masa.

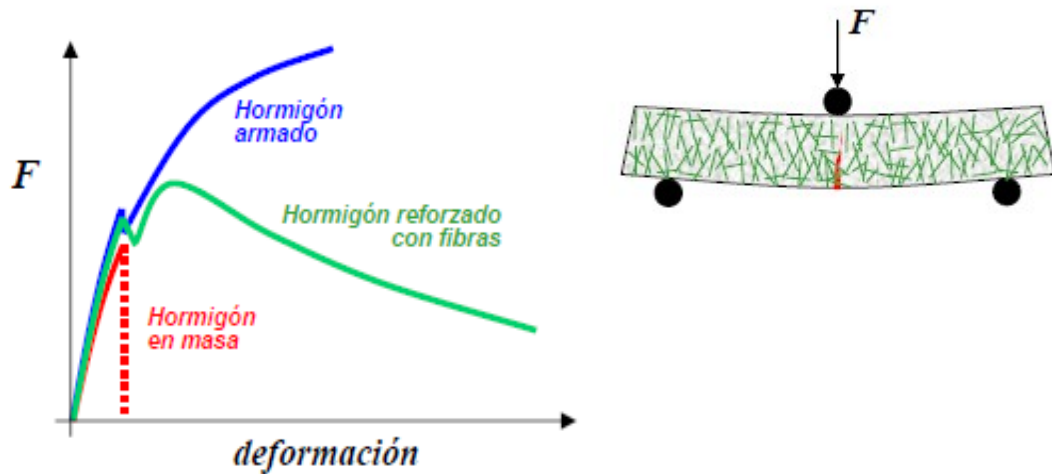


Figura.1.3. Comportamiento del Hormigón armado, H.M. , Hormigón reforzado con fibras.

Las características con respecto a los hormigones convencionales que se pueden observar son las siguientes:

- Mayor resistencia a flexotracción y tracción directa (permite optimizar espesores y disminuir la cuantía de armaduras pasivas).
- Mayor tenacidad: mayor resistencia al impacto y a la fatiga.
- Permiten mayor control de la fisuración: Superficies continuas de mayores dimensiones y más durables.
- Mejor resistencia al Fuego: al fundirse las fibras se disminuye el desconchamiento (spalling).
- Mayor dificultad de confección y puesta en obra.

Se consideran dos tipos de fibras:

→ **ESTRUCTURALES:** Su contribución puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón. La EHE-08 considera unos parámetros unas especificaciones para las fibras con finalidad estructural, que son las siguientes:

- Tamaño mínimo de fibra → >2 veces el tamaño máximo del árido.
- Contenido mínimo de fibra de acero → >20 kg/m³
- Distribución uniforme en el amasado → Diferencias menores del 10%.
- Resistencia (característica) residual a flexotracción →
Para aberturas de fisura de 0,5mm ($f_{R,1,K}$) y 2,5mm ($f_{R,3,K}$)

→ **NO ESTRUCTURALES:** No se consideran en el cálculo pero suponen una mejora ante determinadas propiedades (control de la fisuración, incremento de la RF, abrasión, impacto; etc).

1.3.TIPIFICACIÓN

Tipificación de los hormigones con fibras por propiedades se hará del siguiente modo:

- ESTRUCTURALES (HA-30/F/16/IIIa)

T-R/f-R1-R3/C/TM-TF/A

Siendo:

T = HMF para hormigones en masa, HAF para hormigón armado, HPF para hormigón pretensado.

R = Resistencia característica a compresión (N/mm²)

f = Tipo de fibra, A acero, P poliméricas y V vidrio.

R1, R3= Resistencia característica residual a flexotracción especificada (N/mm²) 0,5mm y 2,5mm de abertura de fisura, para misiones estructurales; en caso de misión no estructural:

CR para fibras con misión de control de la retracción

RF para fibras con misión de mejora de la resistencia al fuego

O para fibras con otras misiones.

C = Consistencia, seca S, plástica P, blanda B, fluida F.

TM = tamaño máximo del arido (mm)

TF = Longitud máxima de la fibra (mm)

A = designación del ambiente.

1.4. TIPOS DE FIBRAS

La elección del tipo de fibra generalmente está condicionada por la aplicación que se le vaya a dar, pero también influyen factores económicos, de disponibilidad de materiales y de durabilidad.

Tipo de Fibra	Diámetro Equivalente (mm)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a Tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Alargamiento de Rotura (%)
Acrílico	0.02-0.35	1100	200-400	2	1.1
Asbesto	0.0015-0.02	3200	600-1000	83-138	1-2
Algodón	0.2-0.6	1500	400-700	4.8	3-10
Vidrio	0.005-0.15	2500	1000-2600	70-80	1.5-3.5
Grafito	0.008-0.009	1900	1000-2600	230-415	0.5-1
Aramida	0.01	1450	3500-3600	65-133	2.1-4
Nylon	0.02-0.4	1100	760-820	4.1	16-20
Poliéster	0.02-0.4	1400	720-860	8.3	11-13
Polipropileno	0.02-1	900-950	200-760	3.5-15	5-25
Polivinil alcohol	0.027-0.660	1300	900-1600	23-40	7-8
Carbón	-	1400	4000	230-240	1.4-1.8
Rayón	0.02-0.38	1500	400-600	6.9	10-25
Basalto	0.0106	2593	990	7.6	2.56
Polietileno	0.025-1	960	200-300	5.0	3
Sisal	0.08-0.3	760-1100	228-800	11-27	2.1-4.2
Coco	0.11-0.53	680-1020	108-250	2.5-4.5	14-41
Yute	0.1-0.2	1030	250-350	26-32	1.5-1.9
Acero	0.15-1	7840	345-3000	200	4-10

La pérdida de trabajabilidad que la adición de fibras provoca en el hormigón condiciona el contenido máximo de fibras que se puede incorporar en la dosificación, que suele situarse para las fibras de acero alrededor de los 100 kg/m³.

A continuación se redactará una breve definición y características de 3 tipos de fibras: vidrio, polipropileno y acero. En el caso de las fibras de acero se profundizará más en el capítulo 2.

1.4.1. Fibras de vidrio

Este tipo de fibras podrán emplearse siempre que se garantice un comportamiento adecuado durante la vida útil del elemento estructural, en relación con los problemas potenciales de deterioro de este tipo de fibras como consecuencia de la alcalinidad del medio.

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

Como hemos mencionado antes las fibras se incorporan en el concreto para mejorar las propiedades mecánicas de éste. Es un material fibroso obtenido al hacer fluir vidrio fundido a través de una pieza de agujeros muy finos que al solidificarse tiene suficiente flexibilidad como para ser usado como fibra.

El desarrollo de las fibras de vidrio (Class Fiber Reinforced Cement, GRC) desde 1950, es un material compuesto que está formado por una matriz de mortero de cemento y fibras cortas de vidrio. En 1969 se utilizaban fibras de amianto, pero debido a su componente cancerígeno se sustituyeron por otras. Las fibras de vidrio utilizadas son del tipo (AR), resistentes a los entornos alcalinos.



Figura 1.4.1 Fibras de vidrio

Existen varios tipos de fibras.

Vidrio E: Desde 1930, la fibra de vidrio ha sido considerada uno de los materiales del futuro debido a sus cualidades dieléctricas. Es el más comúnmente usado, tanto en la industria textil, como en compuestos donde responde por el 90% de los refuerzos usados.

Vidrio R: de altas cualidades mecánicas. Se utiliza en sectores como aviación, espacio y armamentos. Satisface en términos de comportamiento de materiales en relación a fatiga, temperatura y humedad.

Vidrio D: de características dieléctricas muy buenas. Son usados como un material que es permeable a ondas electromagnéticas. Usadas en la fabricación de ventanas electromagnéticas.

Vidrio C: Resistente a la corrosión, como capa externa anticorrosiva de tubos.

Vidrio AR: resistente a álcali. Desarrollado para el refuerzo de morteros y hormigones. Su alto contenido de óxido de zirconio ofrece resistencia excelente para compuestos alcalinos. Éstas dan mejores resultados de roturas, con buena durabilidad. Esto significa que las piezas fabricadas con hormigón reforzado con estas fibras, pueden tener un peso menor.

Propiedades:

- Buen aislamiento térmico
- Alta resistencia a tracción y compresión
- Buen mecanismo de rotura
- Buena resistencia al impacto

Aplicación:

- Industria de la construcción (paneles fachada, cerramientos).
- Protección contra el fuego (puertas, pantallas).
- Saneamiento (tuberías, pozos de registro, arquetas).
- Aislamiento térmico.

1.4.2. Fibras Poliméricas

Las fibras poliméricas están formadas de un material polimérico (nylon, poliéster..) según el proceso de fabricación se clasifican en dos tipos:

TIPO 1) Monofilamentos extruidos;

TIPO 2) láminas fibriladas.

Sus dimensiones pueden ser variables al igual que su diámetro y su formato:

Micro-fibras: < 0,30 mm diámetro

Macro-fibras: >0,30 mm diámetro

Las macro-fibras pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable (desde 20 mm a 60 mm), que debe guardar relación con el tamaño máximo del árido (relación de longitud 3:1 fibra: TM).

Las micro-fibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente en este caso que el número de fibras por kg sea muy elevado. Además de por sus características físico-químicas, las micro-fibras se caracterizan por su frecuencia de fibra, que indica el número de fibras presentes en 1 kg, y que depende de la longitud de fibra y muy especialmente de su diámetro.

Un polímero es una molécula de peso molecular elevado con una estructura compleja, fruto de la repetición de una estructura menos llamada monómero. Uno de los principales aspectos a destacar es que además de ser muy económicos, son químicamente inertes, muy estables en el medio alcalino que supone el hormigón, presentando una superficie hidrófoba, por lo que no absorbe agua durante la mezcla ni el posterior fraguado. Una desventaja que merece mención es su bajo módulo de elasticidad.

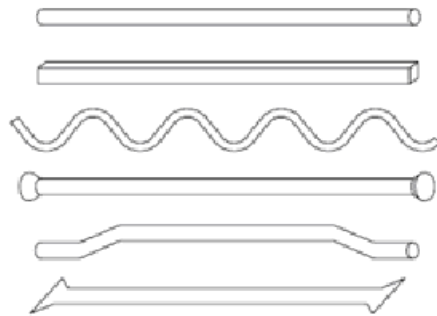


Figura 1.4.2. Fibras Poliméricas

1.4.3. Fibras de Acero

Son elementos de corta longitud y pequeña sección que se adicionan al hormigón con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas, con las características necesarias para dispersarse aleatoriamente en una mezcla.

La geometría de las fibras es diversa, pudiendo tener sección circular, cuadrada o rectangular. Además, con el fin de mejorar la adherencia con el hormigón, las fibras pueden presentar los extremos conformados, ondulaciones, corrugas, aplastamientos etc. En general las dimensiones de las fibras oscilan entre 0,25 y 0,80 mm de diámetro y entre 10 y 75 mm de longitud.



Propiedades:

- Aumento de la resistencia a fatiga
- Aumento de la ductilidad
- Mejora de la resistencia al impacto y abrasión
- Reducción de la microfisuración
- Mejora resistencia al fuego
- Mayor resistencia a tracción
- Incremento capacidad de carga
- Resistencia contra la propagación de fisuras

La efectividad del refuerzo matriz-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades:

- Una resistencia a tracción significativamente mayor que la del hormigón.
- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el hormigón.
- Aumento de la ductilidad
- Aumento de la resistencia a fatiga
- La matriz obliga a las fibras a trabajar de forma conjunta.
- Aísla las fibras entre ellas, y así trabajan de forma separada. Ello evita la propagación de fisuras en el soporte.

La matriz actúa como un revestimiento de protección de las fibras, protegiéndolas frente a ataques mecánicos y químicos.

	Longitud (mm)	Ø Medio (µm)	Tracción (MPa)	Mod. Elástico E (MPa)
Acero	30 a 60	500	1100	210000
Polipropileno	6 a 24	35 a 400	340 a 500	8500 12500
Carbono	10 a 20	80 a 10	80 a 10	180000 240000
Vidrio	aprox. 12	14		72000

1.5 CONCEPTOS GENERALES DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES REFORZADOS CON FIBRAS

Influencia de la Longitud de la Fibra

Las características mecánicas de los compuestos reforzados con fibras dependen no sólo de las propiedades de la fibra, sino también del grado en que una carga aplicada se transmite a la fibra por medio de la fase matriz. En este proceso de transmisión de carga es muy importante la magnitud de la unión en la interfaz de las fases matriz y fibra. Al aplicar un esfuerzo de tracción, la unión fibra-matriz cesa en los extremos de la fibra y en la matriz se genera un patrón de deformación como el que se muestra en la Imagen; en otras palabras, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz.

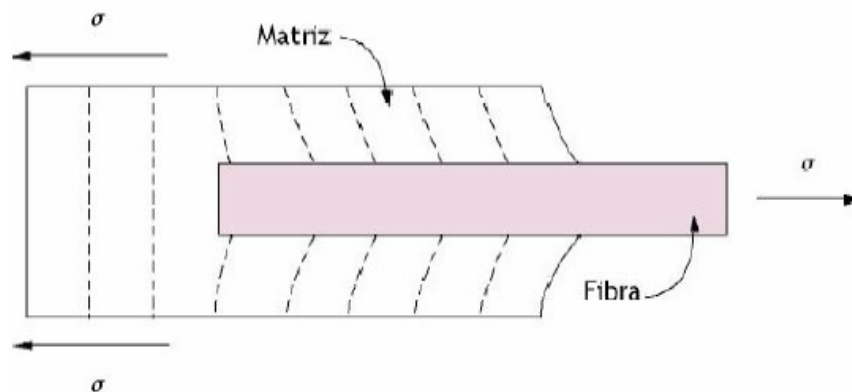


Figura 1.5.1.

Patrón de deformación en una matriz que rodea a una fibra sometida a un esfuerzo de tracción.

Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y la rigidez del material compuesto. Esta longitud crítica l_c depende del diámetro d de la fibra, de la resistencia a la tracción f y de la resistencia de la unión matriz-fibra (o resistencia al cizalle de la matriz), c , de acuerdo con:

$$l_c = \frac{\sigma_f d}{\tau_c}$$

Las fibras con $l > 15 l_c$ se denominan *continuas*; y las fibras de menor longitud se denominan *discontinuas* o *fibras cortas*. En las fibras discontinuas de longitud significativamente menor que l_c , la matriz se deforma alrededor de la fibra de modo que apenas existe transferencia del esfuerzo y el efecto del reforzamiento de la fibra es insignificante.

Influencia de la Orientación y de la Concentración de la Fibra

La disposición u orientación relativa de las fibras y su concentración y distribución influyen en la resistencia y en otras propiedades de los materiales compuestos reforzados con fibras. Con respecto a la orientación existen dos situaciones extremas:

- 1 - Alineación paralela de los ejes longitudinales de las fibras
- 2 - Alineación al azar. Las fibras continuas normalmente se alinean

Mientras que las fibras discontinuas se pueden alinear (Figura 1.5.2 b) o bien se pueden orientar al azar (Figura 1.5.2 c) o alinearse parcialmente. En el caso de esta investigación, dado el largo de la fibra de polipropileno l , equivalente a 12 mm, se tiene que $l < 6 l_c$, con l_c longitud crítica de la fibra. Es decir, se tiene una fibra discontinua o fibra corta. Además esta fibra estará orientada al azar.

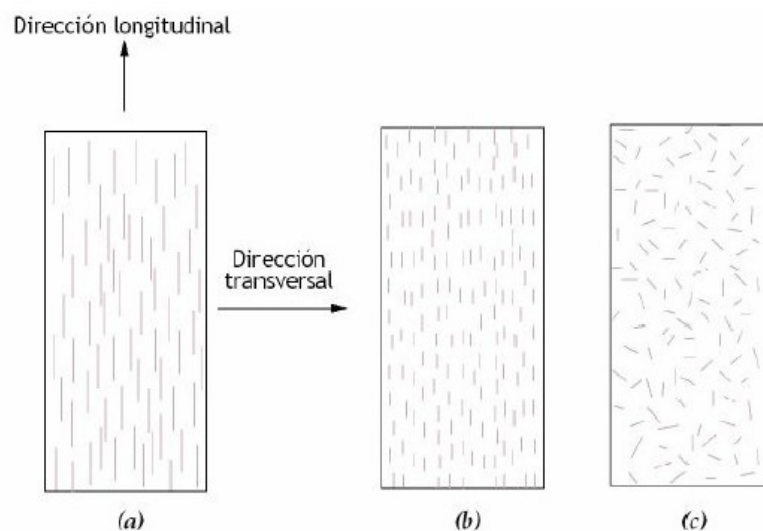


Figura 1.5.2 (a) Representaciones esquemáticas de compuestos reforzados con fibras (a) continuas y alineadas, (b) discontinuas y alineadas y (c) discontinuas y orientadas al azar.

Fase Fibrosa

Una importante característica de muchos materiales, especialmente los frágiles, es que las fibras con diámetros pequeños son mucho más resistentes que el material macizo. Como es sabido, la probabilidad de la presencia de una imperfección superficial crítica que conduzca a la rotura disminuye cuando aumenta el volumen específico. Este fenómeno se utiliza con ventaja en los compuestos reforzados con fibras. El material utilizado como fibra de refuerzo debe tener alta resistencia a la tracción.

Fase Matriz

La fase matriz de un material compuesto con fibras ejerce varias funciones. En primer lugar, une las fibras y actúa como un medio que distribuye y transmite a las fibras los esfuerzos externos aplicados; sólo una pequeña fracción del esfuerzo aplicado es resistido por la matriz. Además, la matriz debe ser dúctil y, por otra parte, el módulo elástico de la fibra debe ser mucho mayor que el de la matriz. En segundo lugar, la matriz protege las fibras del deterioro superficial que puede resultar de la abrasión mecánica o de reacciones químicas con el medio ambiente. Estas interacciones introducen defectos superficiales capaces de originar grietas, que podrían producir fallos con esfuerzos de tracción relativamente bajos. Finalmente, la matriz separa las fibras y, en virtud de su relativa blandura y plasticidad, impide la propagación de grietas de una fibra a otra, que originaría fallos catastróficos; en otras palabras, la matriz actúa como una barrera que evita la propagación de grietas. Aunque algunas fibras individuales se rompan, la rotura total del material compuesto no ocurrirá hasta que se hayan roto gran número de fibras adyacentes, que forman un agregado de tamaño crítico. Es esencial que la adherencia de la unión entre fibra y matriz sea elevada para minimizar el arrancado de fibras. En efecto, la resistencia de la unión tiene gran importancia en el momento de seleccionar la combinación matriz-fibra. La resistencia a la tracción final del compuesto depende, en gran parte, de la magnitud de esta unión; una unión adecuada es esencial para optimizar la transmisión de esfuerzos desde la matriz a las fibras.

1.6 COMPORTAMIENTO EN ESTADO FRESCO

El hormigón fresco es aquel concreto recién preparado cuyo estado es plástico y moldeable, en el cual no se produce el fraguado ni el endurecimiento y adopta la forma del encofrado.

La propiedad reológica del hormigón fresco depende fuertemente de la característica de lavorabilidad de la matriz, que resulta influenciada por las dimensiones del inerte, de la naturaleza de la fibra, de la dosificación y de sus geometrías.

Las propiedades del hormigón fresco son las siguientes:

1. Trabajabilidad
2. Consistencia
3. Segregación
4. Exudación
5. Tiempo de fraguado
6. Peso unitario
7. Uniformidad

Factores que afectan la **trabajabilidad**: Está influenciada principalmente por la pasta, el contenido de agua y equilibrio adecuado entre agregados gruesos y finos, produciendo en el caso óptimo una suerte de continuidad en el desplazamiento natural.

Cemento: > trabajabilidad cuando la cantidad de cemento sea >;
> fineza > trabajabilidad.

Canto rodado siempre más trabajable.

Los agregados rodados angulosos necesitan mayor cantidad de agua para la misma trabajabilidad que un agregado liso.

Las fibras de acero reducen la trabajabilidad, por ello hay que tener precaución de no agregar más agua a la mezcla ya que esto produciría una reducción de la resistencia de la mezcla.

Consistencia: A la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse o adaptarse a una forma específica. Define la humedad de la mezcla por su grado de fluidez de la misma, se define por el asentamiento de la mezcla (ensayo Cono de Abrams). Influye mucho el método de compactación.

Segregación: La descomposición mecánica del concreto fresco en sus partes constituyentes cuando el agregado grueso tiende a separarse del mortero. La segregación hace que el concreto sea: más débil, menos durable y dejará un pobre acabado de superficie.

Exudación: Es definida como la elevación de una parte del agua de la mezcla hacia la superficie, generalmente debido a la sedimentación de sólidos. El proceso se inicia momentos después que el concreto ha sido colocado y consolidado en los encofrados y continua hasta que se inicia el fraguado de la mezcla.

Homogeneidad: es la cualidad que tiene el hormigón para que sus componentes se distribuyan regularmente en la masa.

Ensayos que se realizan al hormigón fresco:

- Extracción de muestras de hormigón fresco
- Asentamiento de Cono.
- Ensayo de Vebe.

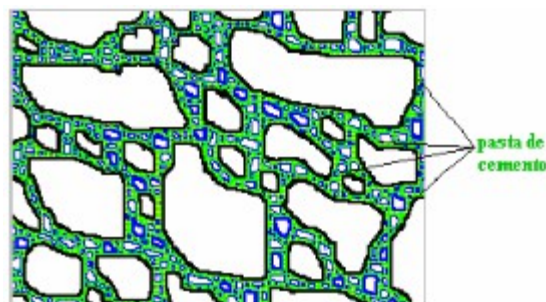


Figura 1.6.1. Estructura interna de hormigón fresco.

1.7 COMPORTAMIENTO EN ESTADO ENDURECIDO

El hormigón experimenta un proceso de endurecimiento progresivo que lo transforma de un material plástico en un sólido. Antes de su total endurecimiento, la mezcla experimenta dos etapas dentro de su proceso general que son: fraguado inicial y fraguado final. El primero corresponde cuando la mezcla pierde su plasticidad volviéndose difícilmente trabajable. Conforme la mezcla continúa endureciendo, esta llegará a su segunda etapa alcanzando una dureza tan apreciable que la mezcla entra ya en su estado de fraguado final.

Propiedades del hormigón endurecido:

1. Densidad
2. Resistencia Mecánica (compresión, tracción y flexión)
3. Variaciones de volúmenes
4. Propiedades elásticas y plásticas
5. Permeabilidad
6. Durabilidad

El hormigón experimenta variaciones de volumen, dilataciones o contracciones, durante toda su vida útil por causas físicas-químicas. El tipo y magnitud de estas variaciones están afectados en forma importante por las condiciones ambientales existentes de humedad y temperatura y también por los componentes presentes en la atmósfera.

La variación de volumen derivada de las condiciones de humedad se denomina retracción hidráulica, y las que tienen por causa de temperatura, retracción térmica y la retracción por carbonatación.

El conocimiento de las **propiedades elásticas** del hormigón son necesarias para establecer la relación entre tensiones y deformaciones, aspecto que adquiere gran importancia en algunos problemas de tipo estructural.

Propiedad elástica: el módulo es constante e independiente de la tensión aplicada.

Propiedad plástica: A pesar del carácter frágil señalado para el hormigón para las cargas de velocidad normal, éste presenta un comportamiento plástico cuando una determinada carga permanece aplicada un largo tiempo, produciéndose una deformación denominada fluencia del hormigón.

Permeabilidad: el hormigón es un material permeable, es decir que, al estar sometido a presión de agua exterior, se produce escurrimiento a través de su masa. El grado de permeabilidad depende de su constitución. Para conseguir más permeabilidad: relación a/c lo más baja posible, dosis de cemento lo más baja, utilizar contenido apropiado de granos finos.

Durabilidad: Durante su vida útil, el hormigón está permanentemente expuesto a las acciones provenientes de agentes externos e internos, que pueden afectar su durabilidad si no se les tiene en cuenta.

Ensayos que se realizan al hormigón endurecido:

- Ensayo de compresión de probetas cúbicas.
- Ensayo de tracción por flexión.
- Ensayo de tracción por hendimiento.
- Determinación del índice del esclerómetro.



Figura 1.7.1. Estructura interna de hormigón endurecido.

1.8 NORMATIVA UTILIZADA PARA EL HORMIGÓN EN ITALIA Y EN ESPAÑA

Normativa Italiana:

Hormigón → D.M.14 enero NTC 2008 / UNI EN 206-1:2006

Hormigones reforzados con fibras → CNR_DT204_2006-1

Normativa Española:

Hormigón → EHE-2008

Hormigones reforzados con fibras → EHE-08 anejo 14

CAPITULO 2

HORMIGÓN CON FIBRAS DE ACERO

2.1 DEFINICIÓN

Los hormigones con fibras de acero están formadas, esencialmente, por un conglomerante hidráulico, generalmente cemento portland, áridos finos y gruesos, agua y fibras de acero discontinuas cuya misión es contribuir a la mejora de determinadas características de los hormigones.

Según la EHE-08 son hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa, en proporción menor del 1,5% en volumen.

Estos hormigones tienen menos docilidad que los hormigones tradicionales. Debe proveerse una dispersión uniforme de las fibras y prevenirse una segregación o agrupación de las mismas.

2.2 COMPONENTES DEL SFRC:

Los SFRC están constituidos esencialmente por los mismos componentes que un hormigón tradicional y adicionalmente fibras de acero. La inclusión de las fibras, además de alterar el comportamiento del hormigón en estado endurecido, también lo hace en estado fresco, por lo que a algunos de los componentes se les exigen condiciones que en los hormigones tradicionales no son necesarias.

En función de la cantidad de fibras que se van a adicionar al hormigón y de la geometría de éstas, el material compuesto tendrá que sufrir ciertas modificaciones. Estas modificaciones pasan principalmente por una limitación en el tamaño máximo del árido, menores valores de la relación grava-arena, mayores cantidades de aditivos reductores de agua, y mayor demanda de finos.

La Tabla. Muestra el rango de proporciones para un SFRC según el ACI Comité 544 1R-96 (2009).

Componentes de la mezcla	Tamaño máximo de árido (mm)		
	10	20	40
Cemento (kg/m^3)	350-600	300-530	280-415
Agua/cemento	0.35-0.45	0.35-0.50	0.35-0.55
% árido fino-grueso	45-60	45-55	40-55
% aire ocluido	4-8	4-6	4-5
Fibras conformadas (V_f %)	0.4-1.0	0.3-0.8	0.2-0.7
Fibras planas (V_f %)	0.8-2.0	0.6-1.6	0.4-1.4

2.2.1. Cemento

El cemento es un componente decisivo en la docilidad del material en estado fresco y, posteriormente, en las características mecánicas del hormigón endurecido. Se puede emplear cualquier cemento que cumpla con los requisitos establecidos para un Hormigón tradicional, siempre que sea capaz de proporcionar al hormigón las características que exige el proyecto. Cuanto mayor sea el contenido de fibras y menor el tamaño máximo del árido, será necesario emplear una mayor cantidad de cemento con la finalidad de proporcionar más pasta.

2.2.2. Agua

Se puede emplear agua que cumpla los mismos requisitos exigidos en el caso de hormigones tradicionales armados, poniendo especial atención a los agentes que puedan afectar a las fibras. La Instrucción EHE 2008 establece, en el Anejo 14, que el aumento de la consistencia debido al uso de las fibras debe ser compensado siempre con la adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de agua.

2.2.3. Áridos

Además de cumplir los requerimientos de composición, resistencia, durabilidad, estabilidad y limpieza establecidos para el empleo en hormigones tradicionales, los áridos deben tener unos tamaños de partícula, granulometría y formas adecuadas para la elaboración de un SFRC.

Se pueden emplear áridos rodados o machacados, siendo más adecuado el empleo de los primeros ya que para valores idénticos de relación agua/cemento se obtiene mejor docilidad que con los áridos machacados.

Respecto del contenido de finos, cuando se adicionan fibras de acero es aconsejable incorporar mayor cantidad de finos para reducir el riesgo de segregación, aumentar la cohesión y favorecer la movilidad de las fibras.

La movilidad potencial de las fibras depende de la proporción de árido grueso y del tamaño máximo de árido. Cuanto mayor sean estos dos parámetros menor será la movilidad potencial de las fibras (Hannant 1978).

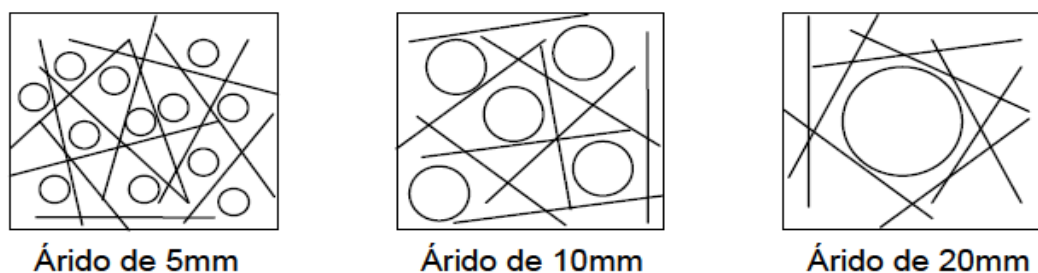


Figura 2.2.1 Efecto del tamaño del árido en la distribución de las fibras.

Tamaños máximos de áridos mayores que 20mm no son recomendados, aunque en algunos estudios se han empleado áridos de hasta 38mm con resultados satisfactorios. Se recomienda también que el tamaño máximo de árido no supere:

- 2/3 de la longitud máxima de la fibra.
- 1/5 del lado menor del elemento.
- 3/4 de la distancia libre entre las barras de armado.

La relación árido grueso/árido fino (Gr/Ar) suele reducirse respecto de lo especificado para un hormigón tradicional con las mismas exigencias de resistencia, ya que un mayor volumen de mortero facilita la movilidad de las fibras.

2.2.4. Aditivos

En los SFRC se emplean principalmente aditivos reductores de agua (superfluidificantes) y aireantes. El Anejo 14 de la EHE-08 establece que, cuando las fibras utilizadas sean metálicas, el ión cloruro total aportado por los componentes no debe exceder del 0,4% del peso del cemento.

Al adicionar fibras al hormigón (principalmente en altas proporciones), éste sufre una reducción sustancial de docilidad. Con el fin de no adicionar agua, ni afectar la resistencia y durabilidad esperadas, se emplean superfluidificantes.

De cualquier manera, si se pretende hacer muy fluido un hormigón con un volumen de fibras alto y no se controla adecuadamente la granulometría de los áridos y la distribución de las fibras en el hormigón, puede producirse apelotonamiento.

Cuando los SFRC van a estar sometidos a ciclos hielo-deshielo, todas las prácticas conocidas para el hormigón tradicional son aplicables, por lo que el uso de un aditivo aireante es una necesidad.

Ensayos previos a la puesta en obra son indispensables sobre todo cuando se combinen adiciones, aditivos y fibras, ya que la efectividad de los componentes al combinarse es desconocida. Se han detectado en algunos casos problemas de incompatibilidad que provocan la inestabilidad del aire ocluido, debido a la reacción de sustancias químicas que contienen las fibras con las adiciones y los aditivos.

2.2.5. Adiciones

Las adiciones usualmente empleadas en los SFRC son materiales puzolánicos tales como puzolanas naturales, cenizas volantes y humo de sílice.

La adición de estos materiales se hace con el fin de reducir la permeabilidad del hormigón, aumentar la durabilidad, mejorar la cohesión del material y en consecuencia la adherencia fibra-matriz, controlar la retracción, disminuir el riesgo de segregación y, en el caso particular de los hormigones proyectados, disminuir el rebote. Por todo esto y por la formación de silicatos similares a los producidos por el cemento, estos materiales dan lugar a hormigones con mayor resistencia.

Adiciones de humo de sílice (HS) al hormigón de entre 7 – 10% como sustitución de cemento son recomendables en los hormigones proyectados en seco, no solo por las propiedades puzolánicas del HS sino también por las modificaciones reológicas que produce en el hormigón en estado fresco debido a la alta superficie específica del HS, razón por la que se reduce el rebote. El HS en SFRC proyectados en seco puede reducir la pérdida de fibras hasta valores del 20%.

2.2.6. Fibras de acero

Las fibras de acero son elementos de corta longitud y pequeña sección que se adicionan al hormigón con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas, con las características necesarias para dispersarse aleatoriamente en una mezcla de hormigón en estado fresco empleando metodologías de mezclado tradicionales.

La efectividad del refuerzo matriz-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades:

- Resistencia a tracción significativamente mayor que la del hormigón.
- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el del hormigón.

El anejo 14 de la Instrucción EHE-08 clasifica las fibras de manera general en estructurales y no estructurales, en función de la capacidad de aumentar la resistencia del hormigón. Las fibras serán estructurales si la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón. Las fibras serán no estructurales en caso contrario. Las fibras suponen una mejora ante determinadas propiedades como el control de la fisuración por retracción, y el incremento en la resistencia al fuego, abrasión e impacto, entre otras.

A) Valor mínimo de la resistencia:

Según el Anejo 14 de la Instrucción EHE-08, para que las fibras puedan ser consideradas con función estructural la resistencia característica residual a tracción por flexión $f_{R,1,k}$ no será inferior al 40 % del límite de proporcionalidad y $f_{R,3,k}$ no será inferior al 20 % del límite de proporcionalidad .

B) Características geométricas

Las convenciones empleadas para describir las fibras geométricas son:

- l_f : longitud de la fibra (mm)
- l_d : longitud desarrollada de la fibra (mm)
- d : diámetro o diámetro equivalente de la fibra (mm)
- λ : esbeltez o relación de aspecto de la fibra (también se denota como l/d)
- A_f : área de la sección transversal de la fibra (mm^2)

El diámetro equivalente es el diámetro de un círculo con un área igual al área de la sección transversal de la fibra. El diámetro efectivo es el diámetro de una circunferencia con un perímetro igual al perímetro de la sección transversal de la fibra. Esta diferenciación de diámetros adquiere relevancia en el caso de fibras con secciones transversales diferentes a las circulares.

Además de las características geométricas también se especifica:

- R_m : resistencia a tracción de la fibra (N/mm^2)
- Previsiones de espacio (espesor, recubrimiento y espacio entre barras de armado en el elemento, si es el caso).
- Forma de suministro: sueltas o en paquetes.

Las fibras deben cumplir con algunos requerimientos mecánicos de resistencia a tracción, doblado y condiciones de superficie. Los ensayos para evaluar estos factores y los criterios de aceptación o rechazo se encuentran en UNE-EN 14889-1 : 2008.

En función del material base utilizado para la producción de las fibras de acero, se clasifican en los siguientes grupos según la normativa.

- **Grupo I:** alambres estirados en frío (cold drawn wire).
- **Grupo II:** láminas cortadas (cut sheet).
- **Grupo III:** extractos fundidos (melt-extracted).
- **Grupo IV:** conformados en frío.
- **Grupo V:** aserrados de bloques de acero (milled from steel blocks).

Las fibras de acero pueden ser de acero al carbono (en ocasiones con aleaciones con el fin de mejorar prestaciones técnicas y mecánicas) o acero inoxidable. También se pueden encontrar fibras con revestimientos de zinc o galvanizadas, que resultan menos costosas que las de acero inoxidable y presentan resistencia a la corrosión.

Las fibras de acero pueden tener formas muy variadas: rectas, onduladas, corrugadas, con extremos conformados, dentadas. Las secciones también pueden ser muy variadas: circulares, cuadradas, rectangulares y planas.

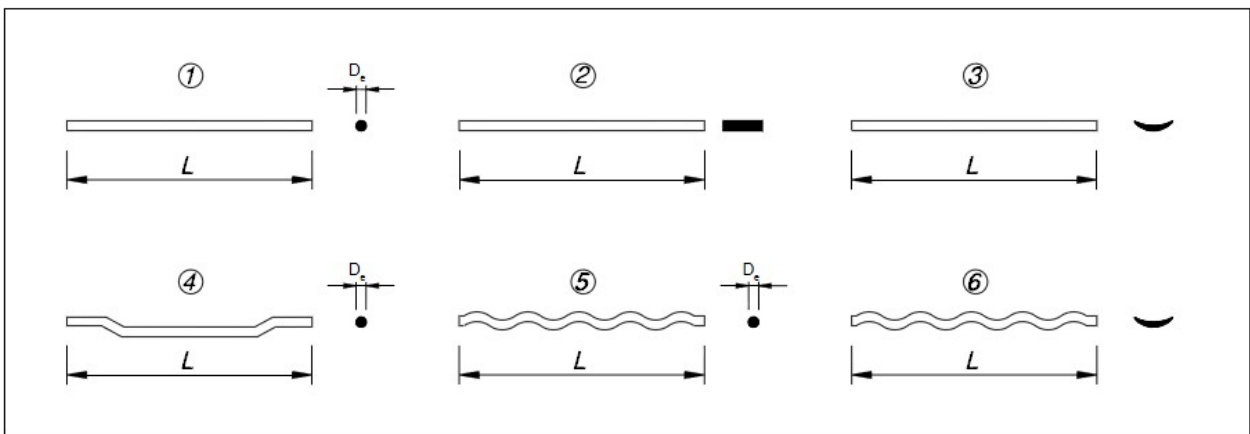


Figura.2.2.2. Formas de las fibras de acero.

C) Longitudes

Además de las limitaciones relacionadas con el tamaño máximo de árido ya comentadas, cuando el hormigón va a ser bombeado, la longitud de la fibra no debe superar $2/3$ del diámetro interior del tubo. Otro factor limitante de la longitud de las fibras es la separación entre las barras de armado cuando éstas están presentes (en estos casos la longitud de las fibras no debe superar la separación mínima entre barras a no ser que se demuestre con ensayos previos que no presenta inconvenientes).

La sección transversal de las fibras depende principalmente del material usado en la fabricación. El grupo I suele tener diámetros de 0.25 a 1mm, en función de la sección del cable del que son obtenidas. El grupo II (por lo general planas y rectas) tienen secciones transversales con espesores de 0.15 a 0.65mm. Independientemente del tipo de fibras, la gran mayoría tienen diámetros entre 0.4 y 0.8 mm y longitudes de 25 a 60mm. Su índice de esbeltez por lo general es menor que 100, generalmente entre 40 y 80.

El contenido de fibras de un SFRC tradicional oscila entre el 0.25 y el 2%. El límite inferior es utilizado para losas con bajas solicitaciones y el límite superior para aplicaciones de seguridad.

Con volúmenes de fibras inferiores al 0.5% y fibras de esbeltez inferior a 50, el incremento de la resistencia a rotura a flexotracción puede ser despreciable. Por lo tanto se requiere de un contenido mínimo de fibras, que resultará menor a medida que aumente la capacidad adherente y la esbeltez de las fibras.

Para fibras de igual longitud, la reducción en el diámetro aumenta el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado o red de fibras. El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente y permitiendo una mejor redistribución de la carga o de los esfuerzos (según anejo 14 EHE-08).

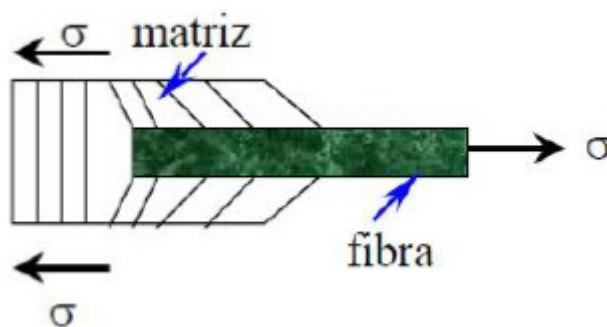
Rossi (2000) plantea que el efecto de las fibras, en las diferentes etapas del proceso de fisuración del hormigón, se refleja a dos escalas: material y estructural. Así, en la fase de fisuración aleatoria, las fibras cosen las fisuras activas y retardan el desarrollo, incrementando la resistencia y la ductilidad a escala del material, mientras que en la etapa en que las macrofisuras se propagan las fibras también cosen las fisuras y así aportan mayor capacidad resistente y ductilidad a escala estructural.

Cuando se requiere que las fibras actúen en las microfisuras, se debe adicionar un gran número de fibras y su diámetro debe ser pequeño. La trabajabilidad del material, que está mucho más ligado a la relación l/d , conduce a preferir fibras cortas. Por otro lado, para controlar las macrofisuras las fibras deben ser lo suficientemente largas para estar adecuadamente ancladas en la matriz, si bien por requerimientos de trabajabilidad las fibras largas deben ser usadas en menores proporciones que las cortas.

En definitiva, la resistencia a tracción y la ductilidad del material pueden ser incrementadas empleando una alta proporción de fibras cortas y, para mejorar la capacidad resistente y la ductilidad de la estructura, se debe añadir una cierta cantidad más baja de fibras largas (Rossi, 2000).

D) Longitud Crítica de la Fibra

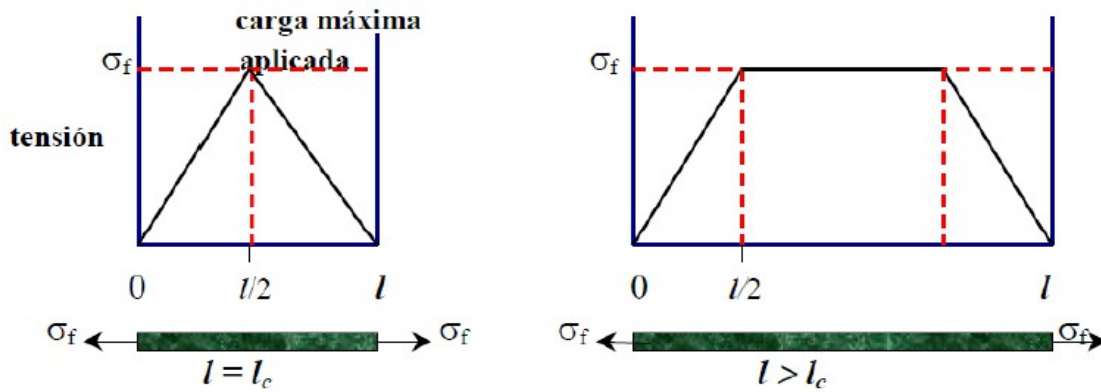
Al aplicar un esfuerzo de tracción, en los extremos de la fibra no hay transmisión de carga desde la matriz, se genera un patrón de deformaciones.



Existe una longitud de fibra crítica para aumentar la resistencia y rigidez del compuesto. Esta longitud crítica l_c depende del diámetro d de la fibra, de la resistencia a la tracción σ_f y de la resistencia de la unión matriz-fibras (o resistencia al cizallamiento de la matriz), τ_c según:

$$l_c = (\sigma_f \cdot d) / \tau_c$$

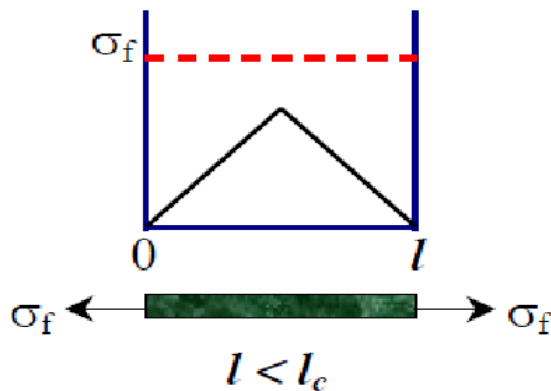
Los perfiles esfuerzo-deformación dependen si la longitud de la fibra es mayor o menos que la longitud crítica:



Si $l = l_c$: la carga máxima se consigue en el centro de la fibra.

Si $l > l_c$: El reforzamiento es más efectivo.

Si $l < l_c$: El reforzamiento es insignificante (la matriz se deforma alrededor de la fibra, casi no existe transferencia del esfuerzo).



Si $l > l_c$: (normalmente $l > 15 l_c$) fibras continuas

Si $l < l_c$: fibras cortas o discontinuas

En la caracterización de las fibras de acero se emplean tres parámetros básicos.

- **Esbeltez o aspecto:** este parámetro se define como la relación entre la longitud de la fibra y su diámetro. A mayor esbeltez, menos será la dosificación de fibras a utilizar.

- **Resistencia a tracción del acero:** la resistencia a tracción de las fibras depende de calidad del acero. Para un contenido bajo o medio de carbono, la resistencia a tracción oscila entre 400 y 1500 Mpa., siendo este tipo de fibras especialmente adecuadas para hormigones de alta resistencia.

- **Forma:** Se obtienen mejores resultados con fibras trefiladas de sección circular y con extremos conformados.

En función de la aplicación que se le va a dar a las fibras, éstas pueden ser galvanizadas, con una mejor resistencia a la corrosión en obras marítimas, o de acero inoxidable, impidiendo la corrosión en atmósferas calientes y con gases agresivos.

Una de las principales ventajas que aportan las fibras de acero es la mejora significativa de la ductilidad del hormigón. A continuación se resumen los efectos positivos que la presencia de fibras de acero induce en el comportamiento del hormigón:

- Mejora de la resistencia a flexotracción
- Aumento significativo de la resistencia a tracción.
- Reducción de la deformación bajo cargas permanentes.
- Aumento de la tenacidad.
- Incremento significativo de la resistencia al impacto y choque.
- Gran resistencia a la fatiga dinámica.
- Control de la fisuración.
- Aumento de la durabilidad del hormigón.

Es preciso señalar que las fibras de acero son las más eficaces y económicas. Los motivos principales son que el módulo de elasticidad del acero es siete veces mayor que el del hormigón, tiene un alto alargamiento de rotura y se caracteriza por una buena adherencia con el hormigón. Además, las fibras de acero se mezclan fácilmente con el resto de componentes del hormigón.

Tabla 2.2.1. Características y desempeños de las fibras según su uso.

	Propiedades	Concreto	Fibra de Acero	Micro / Macro Fibra Sintética Polipropileno extruido / Polietileno
Características físicas y mecánicas de las fibras	Coefficiente de expansión térmica	$12 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$	+ $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	- $1.5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$
	Retracción por reducción de temperatura de 30 °C en fibra de 50 mm de largo	0.018mm	Retracción insignificante	0.23mm
	Comportamiento de fluidez en tensión (Punto de vitrificación)		+ $+370^\circ\text{C}$	- -20°C
	Temperatura de fusión		+ 1500°C	- 165°C (deja de actuar como refuerzo)
	Módulo de Young	30.000 MPa	+ 210.000 MPa	- 3.000 - 10.000 MPa
	Resistencia a la tracción		+ 500 - 2.000 Mpa	+ 200 - 600 MPa
	Peso específico	2.400 kg/m^3	- 7.850 kg/m^3	+ 910 kg/m^3
	Resistencia a los rayos UV		+	- Degradable
	Resistencia a la corrosión		+ En el concreto y en las fisuras < 0.2 mm	+
	Largo		30 - 60 mm	Micro: 6 - 20mm Macro: 30 - 65mm
	Diámetro		0.5 - 1.0 mm	Micro: 0.015 - 0.030mm Macro: 0.5 - 1.0mm
	Indicación de fibras según su uso	Refuerzo para retracción plástica		
Resistencia contra incendio				+ (solo las micro fibras)
Refuerzo sin carga Pre-moldados: manejo y transporte Pisos y Pavimentos: temperatura y retracción plástica			+	+ (solo las macro fibras)
Revestimiento temporal (túneles y minas), permitiendo gran deformación			+	+ (solo las macro fibras)
Control de fisuración			+	
Refuerzo estructural			+	
Resistencia al impacto			+	
Fatiga			+	

+ = Efecto positivo - = Efecto negativo

Tabla 2.2.2. Propiedades de refuerzo de las fibras.

	Fibras de Acero	Micro Fibra Polimérica	Macro Fibra Polimérica
Retracción plástica	+	++++	+
Retracción por secado	++++	×	×
Resistencia al impacto	++++	+	++
Control de fisuración (estado límite de servicio)	++++	×	×
Tensión pos-fisuración (estado límite último)	++	×	+
Dependiente de temperatura	+	-	-
Dependiente de tiempo	+	-	-
Sin ruptura por fluidez	+	-	-
Propiedades anti-spalling	×	++++	×
Resistencia a la fatiga	++++	×	+
Resistencia al fuego	+	-	-
Sin manchas (estética)	+ (*)	+	+
Resistencia a la corrosión	+ En el concreto + Fisuras < 0.2mm	+	+

+ = Efecto positivo **-** = Efecto negativo **×** = efecto insignificante (*) = galvanizado

2.3. ELABORACIÓN

Las fibras de acero actúan en la masa de hormigón como elementos rígidos, de gran área superficial y geometría muy esbelta, mejorando algunas propiedades en estado endurecido y exigiendo modificaciones en los procesos tradicionales de dosificación, fabricación, transporte, vertido, compactación y acabado.

El hecho de adicionar fibras al hormigón tiene un peso importante en el costo total del SFRC, por lo que se hace necesaria la optimización de la dosificación para emplear la cantidad estrictamente necesaria de fibras y así obtener un material que sea más atractivo comercialmente. Cuando la cantidad de fibras a adicionar es baja (20-30 kg/m³), los SFRC pueden ser trabajados sin realizar ninguna modificación sobre las exigencias establecidas para un hormigón tradicional. A medida que aumenta la cantidad de fibras a utilizar se debe de ajustar más la dosificación de los componentes del hormigón.

2.3.1 Amasado

El amasado es una fase crítica de los hormigones con fibras por el riesgo de formación de pelotas de fibras en la mezcla. Para evitar la formación de pelotas y lograr una buena dispersión de las fibras se recomienda adicionarlas a una mezcla ya fluida, dosificar los hormigones con suficiente contenido de árido fino, no emplear fibras muy esbeltas y evitar tiempos de transporte excesivamente largos.

Cuando se prevea un transporte largo, puede plantearse la adición de las fibras en obra. El vertido de las fibras se debe realizar lentamente, entre 20 y 60 kg por minuto con la cuba girando a su máxima velocidad hasta garantizar la distribución homogénea de las fibras en la masa de hormigón; según Anejo 14 de la EHE-08.

El orden de llenado también puede ser decisivo. Como norma general las fibras se incorporarán junto con los áridos, preferentemente, el árido grueso al inicio del amasado, desaconsejándose como primer componente de la mezcla.

Pueden emplearse diferentes metodologías para fabricar los SFRC, la elección depende principalmente del tipo de aplicación que se va a realizar, del tipo y contenido de las adiciones, de los recursos disponibles y del sistema de colocación.

La experiencia ha mostrado que para lograr una dispersión adecuada de las fibras en un SFRC con un contenido en fibras hasta de un 1% por volumen, es necesario un cono de por lo menos 180 mm antes de adicionar las fibras. Con la amasadora funcionando a su máxima velocidad se le adicionan las fibras al hormigón, poniendo especial cuidado en que se dé una distribución homogénea. Es recomendable emplear una malla de 100 mm de luz para que las fibras pasen por ella y se dispersen antes de incorporarse a la mezcla del hormigón.

El método anterior descrito es usualmente empleado para trabajos menores. Sin embargo, si se van a emplear cantidades de hormigón considerables se recomienda adicionar las fibras a la amasadora a medida que se adicionan los áridos y luego continuar con el proceso tradicional de fabricación del hormigón. Este método no requiere de tanto cuidado como el anterior, pero igualmente se debe garantizar que se dé una distribución homogénea.

2.3.2. Consistencia

Mediante ensayos experimentales se ha constatado que la consistencia del SFRC resulta restringida con la adición de fibras en función del volumen de fibras adicionado y su esbeltez. La consistencia se puede evaluar con los siguientes métodos: Cono de Abrams, tiempo de Flujo en el Cono Invertido, Consistómetro Vebe. En nuestro caso se ha utilizado el método Cono de Abrams.

Partiendo de que la presencia de las fibras restringe la fluidez de la matriz, es importante evaluar la consistencia de los SFRC con métodos dinámicos como el Cono Invertido, el Consistómetro Vebe.

Las figuras observadas debajo muestran la influencia de la esbeltez de las fibras, del tamaño máximo de árido y del contenido de fibras sobre la consistencia medida con el Consistómetro Vebe. Así, se define como volumen crítico de fibras aquel valor que hace imposible la correcta compactación de los SFRC.

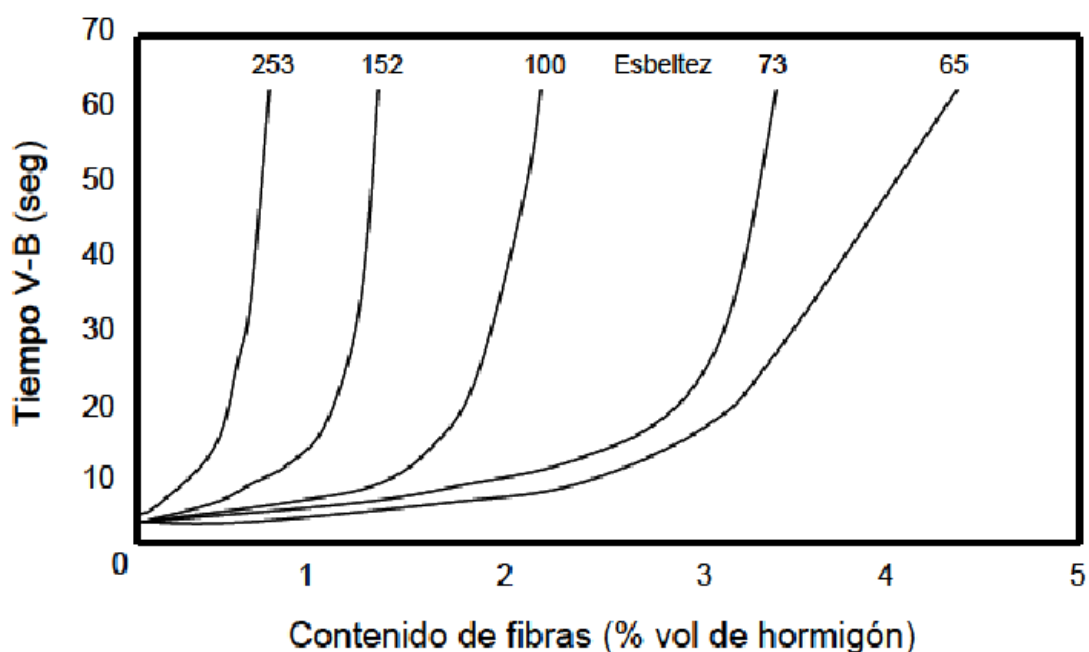


Tabla 2.3.2.1. Efecto de la esbeltez de las fibras sobre la consistencia del hormigón evaluada con el Consistómetro Vebe.

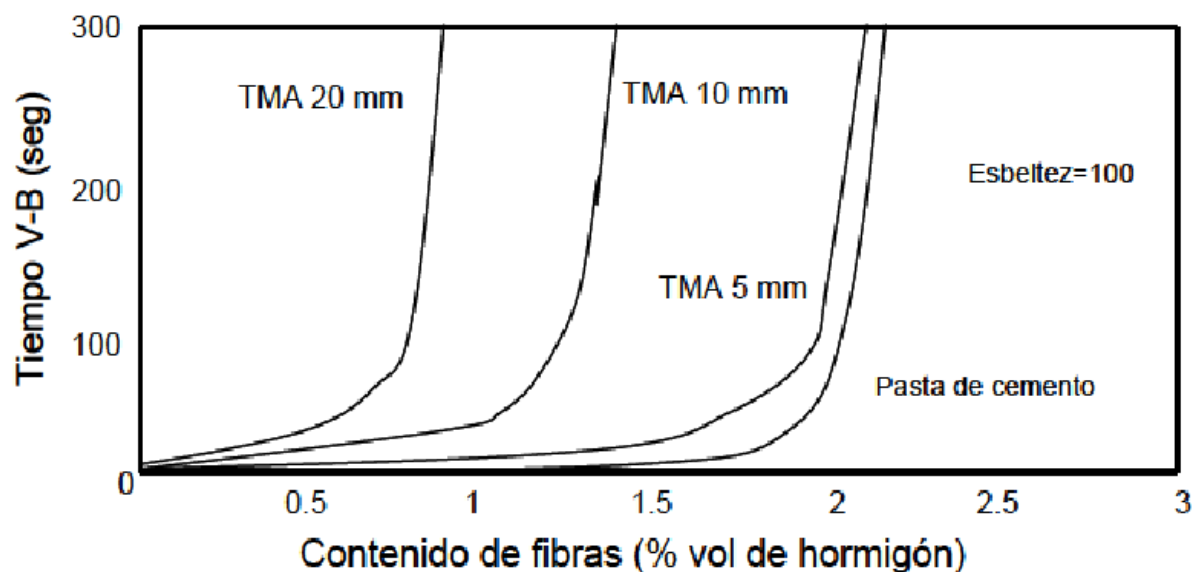


Tabla 2.3.2.2. Influencia del tamaño máximo del árido sobre la consistencia del hormigón evaluada con Consistrómetro Vebe.

2.3.3. Puesta en Obra

Generalmente los SFRC son menos dóciles que los hormigones tradicionales y demandan mayor energía en la compactación. Es necesario utilizar vibrador y no se debe emplear barra para picar el SFRC.

Cuando se emplean vibradores internos, las fibras tienden a orientarse alrededor del vibrador, lo que puede provocar distribuciones circulares y dan lugar a contenidos de fibras y orientaciones heterogéneas entre puntos próximos del elemento. Los vibradores externos son más recomendados, principalmente cuando se trabaja con piezas de pequeñas dimensiones.

2.3.4 Compactación del hormigón

Debido a que el uso de fibras reduce la docilidad del hormigón, se necesitará una mayor energía de compactación. Sin embargo la respuesta a la vibración del hormigón de fibras es mejor que la de un hormigón tradicional por lo que para un mismo asiento en el cono de Abrams se requiere menor tiempo de vibrado.

La compactación origina una orientación preferencial de las fibras. En general éstas tienden a colocarse paralelas a la superficie encofrada, especialmente si se aplica vibradores de superficie. Este efecto es sólo local pero puede ser importante en elementos de poco espesor.

El uso de vibradores internos puede generar zonas con exceso de pasta y pocas fibras en la zona donde se ha dispuesto el vibrador, así como cierta orientación en el sentido tangencial al diámetro externo del vibrador.

2.3.5. Curado

Los cuidados en el curado son esencialmente los mismos que en el caso de un hormigón tradicional, con el agravante de que las principales ventajas que se obtienen con la adición de fibras al hormigón están directamente relacionadas con el incremento de la tenacidad.

2.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DEL SFRC

El hormigón reforzado con fibras de acero puede ser considerado una variante del principio de refuerzo con barras de acero. En este caso, el refuerzo se realiza con un gran número de pequeñas fibras, distribuidas de forma aleatoria en la mezcla. Las fibras de acero son las que tienen la función de soportar las tracciones tras la fisuración del hormigón. Sin embargo, es necesario precisar que la manera de trabajar de las fibras es diferente a la del armado convencional.

En el caso del armado convencional, las barras están ancladas de forma que se alcanza el límite elástico del acero y su capacidad última se desarrolla cuando tiene lugar la rotura del acero. A diferencia de las barras, las fibras de acero se diseñan para que no alcancen el límite elástico del acero, antes de alcanzarlo deben deslizar para desarrollar su máxima eficiencia. La razón es que todas las fibras que cosen una fisura tienen diferente longitud de anclaje y orientación. Esto significa que las deformaciones en las diversas fibras durante la apertura de la fisura son muy distintas, existiendo la posibilidad de que algunas de ellas rompan mientras que otras aún están sometidas a tracciones bajas. No obstante, si las fibras deslizan en lugar de romperse, su resistencia total a tracción será muy importante, consiguiendo además una gran ductilidad. De esto se deduce que la longitud de anclaje debe ser suficientemente grande para garantizar la adherencia y suficientemente pequeña para permitir el deslizamiento de las fibras.

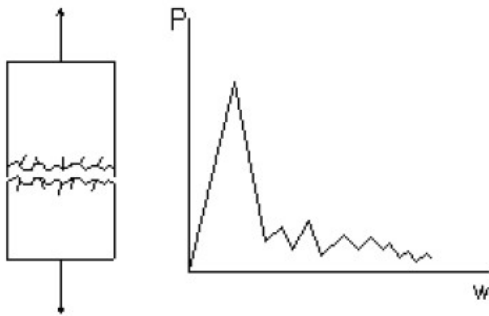


Figura 2.4.1. Relación carga-desplazamiento para rotura de fibras (tracción)

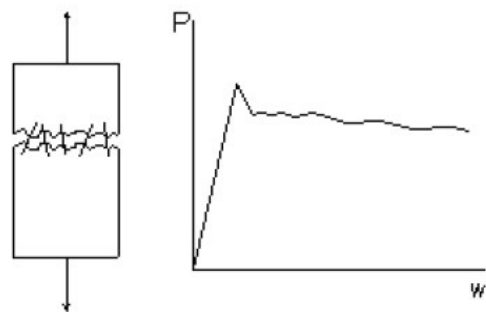


Figura 2.4.2. Relación carga-desplazamiento para deslizamiento de fibras.

2.4.1 Resistencia a Compresión

Es de común aceptación que la adición de fibras al hormigón no conlleva un incremento significativo de la resistencia del hormigón a compresión, si bien suelen producirse ligeros incrementos o incluso descensos de ésta.

En hormigones jóvenes (antes de los 28 días) la capacidad de mantener la carga máxima a compresión se incrementa significativamente con la adición de fibras, a medida que madura el hormigón este incremento se reduce y la capacidad de absorción de energía y la ductilidad se concentran principalmente en la región post-fisura.

Cuanto menor es el tamaño de las probetas se obtienen mayores resistencias a compresión, debido a que acentúan un alineamiento preferente de las fibras. El efecto se hace mucho más sensible a medida que se aumenta la longitud de la fibra. Probetas con mayor esbeltez soportan tensiones sensiblemente mayores, pero presentan respuestas menores dúctiles a compresión. Se debe tener especial cuidado con estas situaciones para no generar falsos panoramas con resultados excesivamente optimistas.

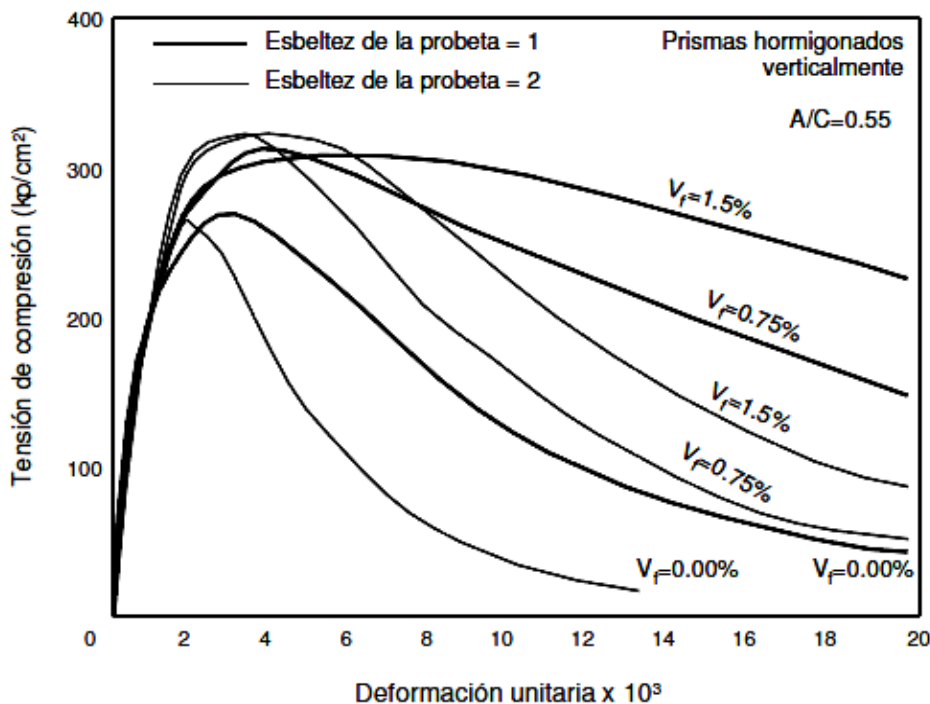


Figura. 2.4.1. Respuesta a compresión simple de SFRC con diferentes V_f y con diferente esbeltez de probeta.

2.4.2 Módulo de Deformación

El módulo de deformación para los SFRC con contenidos habituales de fibras ($V_f < 1\%$) no presenta modificaciones significativas respecto al de los hormigones tradicionales. Generalmente se adopta un módulo de deformación igual al de la matriz o se efectúa una estimación de su valor mediante el uso de formulaciones que relacionan la resistencia a compresión con el módulo de deformación.

2.4.3 Resistencia a Tracción

En el diagrama tensión-deformación a tracción directa del SFRC, las fibras rigidizan sensiblemente la respuesta en fase de pre-fisura respecto de la de un hormigón tradicional y, de forma destacada, aportan una capacidad de resistencia residual post-fisura debido al efecto de cosido entre las dos caras de la fisura.

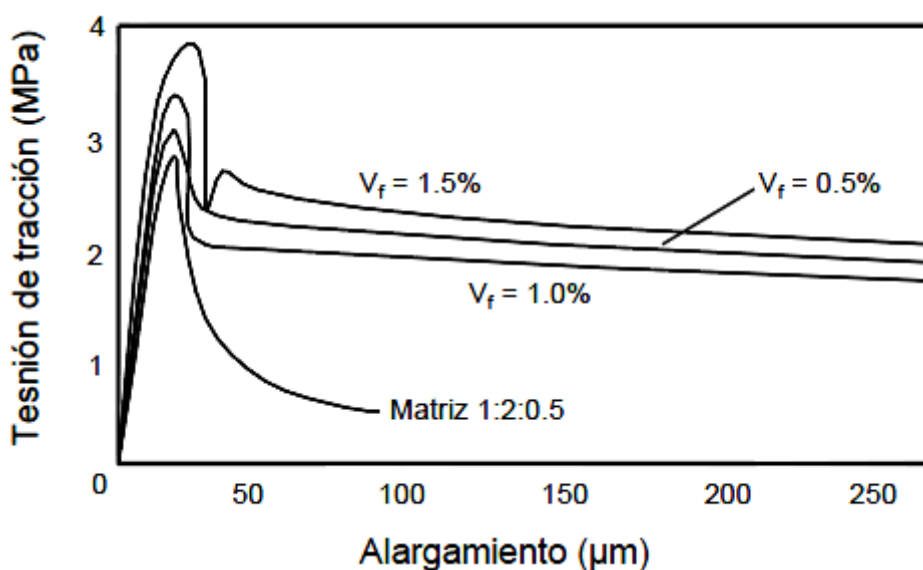


Figura.2.4.2. Curvas tensión de tracción–alargamiento de morteros en función del V_f a tracción directa.

El efecto más importante en el comportamiento mecánico del hormigón, debido a la presencia de las fibras, se manifiesta en la resistencia a tracción post-fisura. La resistencia a tracción post-fisura, a su vez, afecta a muchas otras propiedades mecánicas como la adherencia de armaduras, la resistencia a cortante, la fatiga, etc.

Adicionando fibras en un 1,5% por volumen en hormigones o morteros se obtienen incrementos en la resistencia a tracción directa del orden 30-40%.

La tenacidad del SFRC a tracción se potencia debido a la energía disipada por el rozamiento fibras-matriz, a la flexión de las fibras inclinadas ancladas a ambos lados de las fisuras y a la multifisuración.

Según Naaman (2000), la resistencia a tracción del SFRC se puede estimar mediante:

$$\sigma_{PC} = \Lambda \cdot t \cdot V_f \frac{l_f}{d}$$

Donde:

σ_{PC} : tensión máxima después de fisurar el hormigón.

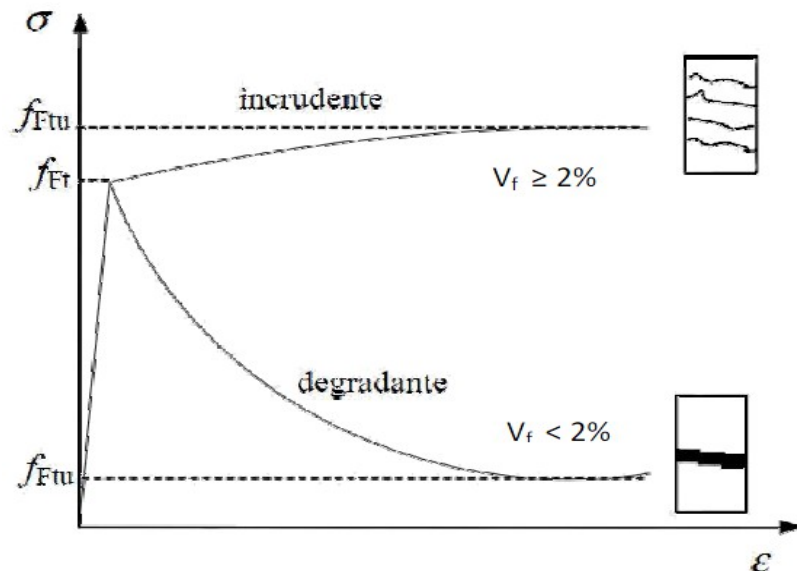
Λ : coeficiente (longitud esperada de arrancamiento, factor de orientación, factor de reducción de grupo asociado con un número de fibras traccionadas por unidad de área.

t : tensión de adherencia fibras-matriz.

V_f : volmen de fibras.

L_f/d :

esbeltez de las fibras.



Si se incrementa V_f se obtendrán valores mayores de σ_{PC} , pero este incremento conduce inevitablemente a matrices elaboradas solamente con partículas finas, sin árido grueso, lo que implica módulos de deformación menores.

Mejorando t (texturizando las fibras, conformando sus extremos, con fibras retorcidas, entre otras) también se consiguen incrementos de σ_{PC} . Es importante garantizar que las medidas que se tomen para incrementar la tensión de adherencia de las fibras en el hormigón t , mantengan un mecanismo de rotura del hormigón por arrancamiento de las fibras u no por rotura de éstas.

2.4.4 Resistencia a flexión.

El incremento de la resistencia a flexotracción al adicionar fibras de acero al hormigón es considerablemente mayor que el de la resistencia a compresión y a tracción. Esto se debe al comportamiento dúctil del SFRC en la zona fisurada por tracción, desarrollando resistencias residuales.

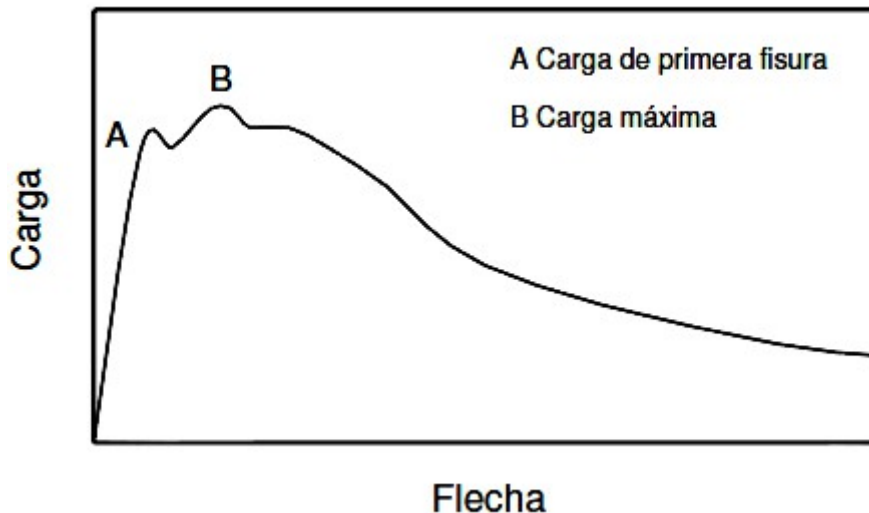


Figura.2.4.4. Curva carga-flecha a flexotracción para un SFRC

Los ensayos de flexotracción en SFRC se realizan principalmente sobre probetas prismáticas. Normalmente, se determina la resistencia a primera fisura, la resistencia a rotura y residual por flexotracción.

Para contenidos habituales de fibras (0.5 a 15) el incremento de la resistencia a primera fisura obtenido con la adición de fibras de acero es mínimo, lo cual indica que esta propiedad depende básicamente de la matriz y muy poco del contenido de fibras, del tamaño y de la forma de éstas, por lo que resulta más rentable mejorar las características de la matriz con el uso de aditivos, humo de sílice, entre otros.

La resistencia a rotura depende principalmente del volumen de fibras y de la esbeltez de éstas, logrando incrementos de hasta el 100% respecto de la resistencia de la matriz, si se utilizan fibras de extremos conformados.

El empleo de mayores volúmenes de fibras, ensayos con sistemas de carga en el centro de la luz, probetas de menores dimensiones, fibras de mayores longitudes con orientación preferencial (cuando el ancho y/o la altura es menor que tres veces la longitud de las fibras) en la dirección longitudinal del elemento, da lugar a mayores incrementos en la resistencia, llegando hasta valores del 150%. Con contenidos de fibras bajos y fibras de esbeltez baja, no es de esperar incrementos significativos de resistencia.

Los ensayos con orientación preferencialmente son representativos cuando se experimenta una orientación similar en el elemento en el que se emplearán el hormigón.

2.4.5. Docilidad del hormigón

El empleo de las fibras en hormigón puede provocar una pérdida de docilidad, cuya magnitud será función del tipo y longitud de la fibra empleada así como de la cuantía de fibras dispuesta. Este factor debe considerarse especialmente al solicitar la consistencia del hormigón en el caso de adición de fibras en obra.

En el caso de hormigones con fibras, se recomienda que la consistencia del hormigón no sea inferior a 9 cm de asiento en el cono de Abrams (si bien depende del tipo de aplicación y sistema de puesta en obra). En este caso, el ensayo del cono de Abrams es poco adecuado y se recomienda ensayar la consistencia de acuerdo con los ensayos propuestos en UNE EN 12350-3 o UNE 83503.

2.5 APLICACIONES DEL HRFA

- Construcción industrial:

Soleras en las que se busque mayor resistencia a flexotracción, reducción del espesor de la losa, mayor distancia entre juntas o ausencia de las mismas, elevada durabilidad del pavimento y de las juntas y mayor resistencia al impacto.

Soleras industriales.

- Obra Pública

Dovelas de túneles

Gunitados reforzados

Revestimientos

Paredes de retención

- Edificación

Losas de cimentación

Obras de rehabilitación

Recrecidos de forjados y losas.

Muros de sótanos

- Prefabricados de hormigón

- Instalaciones refractarias

- Realización de muros acorazados.

CAPITULO 3

ANÁLISIS EXPERIMENTAL

3.1 GENERAL

Los SFRC están constituidos esencialmente por los mismos componentes que un hormigón tradicional y adicionalmente fibras de acero. La inclusión de las fibras, además de alterar el comportamiento del hormigón en estado endurecido, también lo hace en estado fresco, por lo que a algunos de los componentes se les exigen condiciones que en los hormigones tradicionales no son necesarias.

En éste capítulo se realizará la elaboración de un hormigón reforzado con fibras de acero; se harán 4 tipo de mezclas en las cuales las cantidades de los materiales serán las mismas exceptuando las cantidades de acero.

La finalidad de éste estudio es observar el comportamiento a flexión-tracción que experimenta el hormigón, qué características y que beneficios aportan las fibras a éste. Principalmente nos interesa el ensayo a flexión ya que sabemos que el hormigón es un elemento que se comporta muy bien a compresión pero peor a tracción y flexión.

A continuación se verá todo el proceso de la realización de éste estudio, empezando por la denominación de los materiales utilizados para la realización de la mezcla, la dosificación del hormigón con fibras de acero utilizado, la ejecución de las probetas y por último los ensayos realizados a éstas con un breve estudio sobre los resultados obtenidos.

3.2. MATERIAL UTILIZADO

Materiales utilizados para la mezcla, las características de cada uno ya se han denominado en el capítulo anterior, en éste se nombrará solo el tipo de material y algún concepto más.

3.2.1. FIBRA DE ACERO:

- Fibras de acero tipo : DRAMIX
 - Marca: BEKAERT
 - Marcado CE
- Cumple con sistema de calidad según ISO 9001



3.2.2. CEMENTO:

- Cemento tipo 42.5 R:
 - Marca: COLACEM
 - Marcado CE
- Certificado de producto / sistema / laboratorio tecnológico central según Norma Europea EN ISO 9001.
- Certificaciones concedidas por AIDICO.



3.2.3. SUPERFLUIDIFICANTE:



3.2.4. GRAVA Y ARENA:



- Marcado CE

3.3. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

Se realizará la dosificación para un hormigón HA-30, para ello los cálculos se harán mediante la normativa italiana, pero siempre comparando con la española. En primer lugar se ha calculado la cantidad de probetas que se necesitan para los ensayos a realizar: compresión, tracción indirecta, flexión.

ENSAYOS	TAMAÑO	NÚMERO PROBETAS	DÍA DE ROTURA		
			3 días	7 días	28 días
Compresión	10x10x10	6	X	X	X
Tracción	10x10x10	2			X
Flexión	10x10x40	4		X	X
12 probetas → 24 litros, pero realizaremos 30 L.					

En segundo lugar se ha calculado la cantidad de cada elemento correspondiente para realizar la mezcla, según normativa vigente.

AMBIENTE:

Italia:

- XS1- Moderadamente húmedo
- a/c = 0,50
- mínimo Rck = 37 Mpa
- cem ≥ 300 kg/m³
- Norma UNI-EN 206

Tabla.1. Clase de exposición XS según UNI-EN 206

Clase di esposizione	Ambiente	Esempi di strutture che si trovano nella classe di esposizione	Max a/c	Min. R _{ck} (MPa)	Dosaggio minimo di cemento (kg/m ³)	Spessore di co-priferro [®] (mm)	
						c.a.	c.a.p
XS1	Moderatamente umido	• Strutture in prossimità delle coste esposte al trascinarsi eolico dell'acqua (aerosol)	0,50	37	300	45	55
XS2	Bagnato	• Strutture permanentemente e completamente sotto acqua di mare	0,45	45	320	45	55
XS3	Ciclicamente asciutto e bagnato	• Strutture esposte discontinuamente all'acqua marina (alta-bassa marea)	0,45	45	340	45	55

España:

→ IIIa - Marina aérea

Tabla 8.2.2 EHE-08

Resistencia mínima 30 N/mm² según el ambiente (tabla 37.3.2.b EHE-08)

a/c ≤ 0,5

cem ≥ 300 kg/m³ (tabla 37.3.2.a EHE-08)

Tabla 37.3.2.a Máxima relación agua/cemento y mínimo contenido de cemento

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN													
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E	
Máxima relación A/c	Masa	0,65	-	-	-	-	-	-	-	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50
	Armado	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,50	0,50	0,50	0,45	0,55	0,50	0,50	
	Pretensado	0,60	0,60	0,55	0,50	0,45	0,45	0,45	0,50	0,45	0,45	0,55	0,50	0,50	
Mínimo Contenido de cemento (kg/m ³)	Masa	200	-	-	-	-	-	-	275	300	325	275	300	275	
	Armado	250	275	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300	
	Pretensado	275	300	300	300	325	350	325	325	350	350	300	325	300	

(Reproducción de la tabla 37.3.2.a de la EHE Instrucción de Hormigón Estructural)

Tabla 37.3.2.b Resistencias mínimas compatibles con los requisitos de durabilidad

Parámetro de dosificación	Tipo de hormigón	CLASE DE EXPOSICIÓN													
		I	IIa	IIb	IIIa	IIIb	IIIc	IV	Qa	Qb	Qc	H	F	E	
resistencia mínima (N/mm ²)	masa	20	-	-	-	-	-	-	-	30	30	35	30	30	30
	armado	25	25	30	30	30	35	30	30	30	35	30	30	30	
	pretensado	25	25	30	30	35	35	35	30	35	35	30	30	30	

(Reproducción de la tabla 37.3.2.b de la EHE Instrucción de Hormigón Estructural)

CONSISTENCIA:

Italia:

- S5 - (superfluida) Slump $\geq 210\text{mm} = 21\text{cm}$
Diámetro máximo del árido= 16mm → agua= 245 kg/m^3
Regola di Lyse
Estructura fuertemente armada, de reducida sección.

Tabla.2.

Clase de consistencia

Clase di consistenza	Slump (mm)	Denominazione corrente
S1	10-40	terra umida
S2	50-90	plastica
S3	100-150	semi-fluida
S4	160-210	fluida
S5	> 210	super-fluida

Tabla.3.

Obtención del agua en función del diámetro máximo y de la consistencia.

Diametro (mm)	Richiesta d'acqua (kg/m ³) per classe di consistenza				
	S1	S2	S3	S4	S5
8	195	210	230	250	255
16	185	200	220	240	245
20	180	195	215	225	230
25	175	190	210	215	225
32	165	180	200	210	220
63	140	155	175	185	190
125	125	140	155	165	170
160	120	135	150	160	165

España:

→ Según normativa española podrá superarse el asiento $>15\text{cm}$ si en la fabricación del hormigón si se emplean superfluidificantes, como es el caso de éste hormigón.

AGUA:

Italia:

- Según la consistencia y el diámetro máximo del árido.
Tabla.3.: 245 kg/m^3 . Pero al utilizar un aditivo que reduce el 40% del agua, obtendremos → 150 L de agua para la dosificación.
Normativa EN 1008

CEMENTO:

Italia:

→ CEM (II/A-L-42,5 R)

Cemento Portland con caliza

Norma UNI-EN 197/1

Tiempo de fraguado. Inicio \geq 60min // Final \leq 12 horas.

ADITIVO:

Superfluidificantes: reductores de agua manteniendo la misma consistencia aumentan la trabajabilidad.

La dosis es del 0,2 y 0,8 % en peso doble el cemento. Máximo el 1% del cemento.

1% de superfluidificante

40% reducción del agua.

FIBRAS:

España:

Según EHE-08 anejo 14, los hormigones reforzado con fibras tendrán una dosificación $<1,5\%$ en volumen.

Según normativa: mínimo: 20 kg/m^3 (para función estructural).

máximo: 60 kg/m^3

Se harán 4 mezclas en homigoneras de 30 litros, la dosificación de los elementos serán las mismas menos en el caso de la cantidad de fibras.

MEZCLAS	CANTIDAD DE FIBRAS (G)	% FIBRAS
M1	0 g	0,00%
M2	300 g	10,00%
M3	600 g	20,00%
M4	1200 g	40,00%

ÁRIDOS:

La granulometría se realizará con Bolomey, ya que con éste método obtendremos más durabilidad. (es más específico y no tan global como Fuller).

$$V (\text{inerte}) = V (\text{hormigón}) - V (\text{agua}) - V (\text{cemento}) - V (\text{aire})$$

Calculo del inerte para 1m³ de hormigón:

$$\begin{aligned} V_i &= V_{cl} - V_a - V_c - V_{a'} \\ &= 1000 - 150 - 100 - 25 \\ &= 725 \text{ L/ m}^3 \\ &= 725 \times 2,65 = 1920 \text{ Kg} \quad \rightarrow 60\% \text{ grava: } 1150 \text{ Kg} \\ &\quad \rightarrow 40\% \text{ arena: } 770 \text{ Kg} \end{aligned}$$

Calculo para 30 litros de hormigón que es la capacidad máxima de nuestra hormigonera y el total de las probetas a realizar.

$$\begin{aligned} V_i &= V_{cl} - V_a - V_c - V_{a'} \\ &= 30 - 4,5 - 3 - 0,75 \\ &= 21,75 \text{ Kg} \quad \rightarrow 60\% \text{ grava: } 13 \text{ kg} \\ &\quad \rightarrow 40\% \text{ arena: } 9 \text{ kg} \end{aligned}$$

3.4 CALCULO BOLOMEY

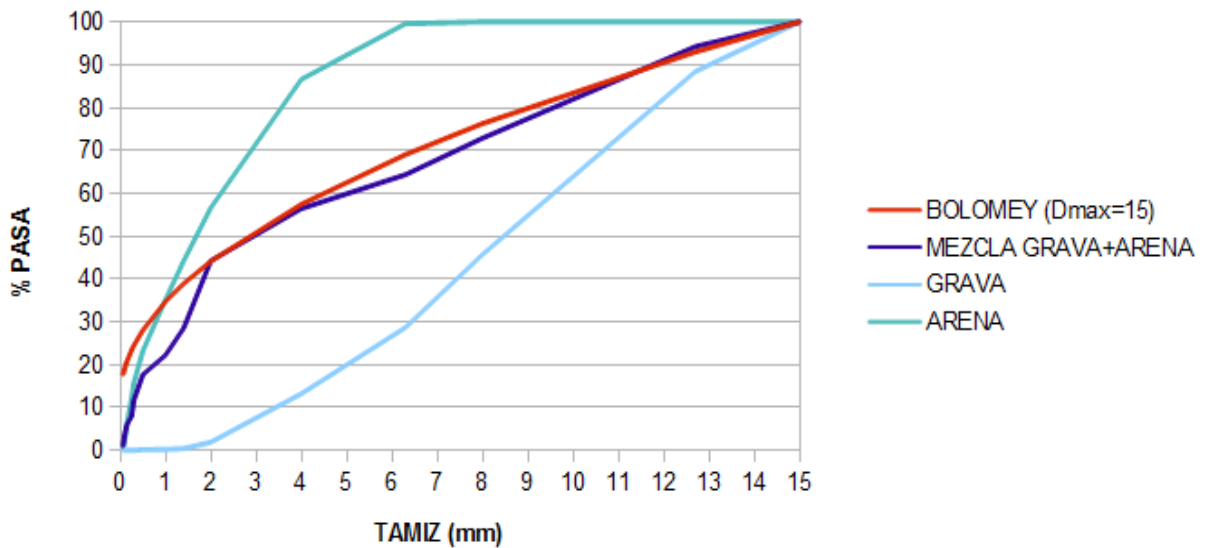
GRAVA				
TAMIZ	Peso Retenido gr	Porcentaje Retenido Parcial %	Porcentaje Retenido Acumulado %	Porcentaje Pasante %
	0	0	0	100
15	148,12	11,6	11,6	88,4
12,7	544,4	42,7	54,3	45,7
8	215,97	17	71,3	28,7
6,3	197,34	15,5	86,8	13,2
4	144,51	11,3	98,1	1,9
2	18,86	1,5	99,6	0,4
1,4	2,07	0,17	99,77	0,23
1	0,96	0,075	99,85	0,15
TOTAL	1275,84		621,32	

Mfg=6,21

ARENA				
TAMIZ	Peso Retenido gr	Porcentaje Retenido Parcial %	Porcentaje Retenido Acumulado %	Porcentaje Pasante %
	0	0	0	0
6,3	4,21	0,4	0,4	99,6
4	142,15	13	13,4	86,6
2	330,78	30	43,4	56,6
1,4	136,47	12,4	55,8	44,2
1	98,73	9	64,8	35,2
0,5	134,93	12	76,8	23,2
0,3	82	7,5	84,3	15,7
0,25	39,53	3,6	87,9	12,1
0,15	63,67	5,8	93,7	6,3
0,09	47,4	4,3	98	2
0,063	14,16	1,3	99,3	0,7
TOTAL	1100,02		520,5	

Mfs=5,2

TAMIZ	Porcentaje Retenido Acumulado %	Porcentaje Retenido Acumulado %	Porcentaje Retenido Acumulado %	PC %
	GRAVA	ARENA	BOLOMEY (Dmax=15)	BOLOMEY (Dmax=15)
15	11,6	0	0	100
12,7	54,3	0	7,03	92,97
8	71,3	0	23,73	76,27
6,3	86,8	0,4	30,97	69,03
4	98,1	13,4	42,46	57,44
2	99,6	43,4	55,87	44,13
1,4	99,77	55,8	61,12	38,88
1	99,85	64,8	65,28	34,72
0,5	100	76,8	71,93	28,07
0,3	100	84,3	75,55	24,45
0,25	100	87,9	76,64	23,36
0,15	100	93,7	79,20	20,80
0,09	100	98	81,18	18,82
0,063	100	99,3	82,30	17,70
TOTAL	621,32	520,5		664,03
	Mfg=6,21	Mfs=5,2	Mfb=6,64	



CALCULO:

$$\text{Formula } \rightarrow xM_{fa} + (1-x)M_{fg} = M_{fb}$$

$$5,2x + (1-x)6,21 = 6,64$$

$$(6,21 - 5,2)x = 6,64 - 6,21$$

$$(1,01)x = 0,43$$

$$\mathbf{X = 0,42 \rightarrow 42\% \text{ arena.}}$$

→ Correcta la dosificación que habíamos hecho, un 40% para arena y un 60% para la grava.

Para 1 m ³	1000 L	AGUA (L)	CEMENTO (Kg/ m ³)	ARENA (Kg)	GRAVA (Kg)	ADITIVO (L)
CANTIDAD		150	300	770	1150	3

DOSIFICACIÓN FINAL:

Para 30 L	0.03 m ³	AGUA (L)	CEMENTO (Kg/ m ³)	ARENA (Kg)	GRAVA (Kg)	ADITIVO (L)
CANTIDAD		4,5	9	23	35	0,09

FIBRAS DE ACERO.	0 g	300 g	600 g	1200 g
------------------	-----	-------	-------	--------

3.5. SEGUIMIENTO DE LA ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN EN LABORATORIO

Se observa en la tabla inferior, un calendario dónde se señalan los días en los que se han hecho los distintos ensayos de las distintas mezclas, por otra parte también aparece el peso de cada probeta de ensayo.

CALENCIARIO DE LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS.

FECHA	MEZCLA	COMPRESIÓN		FLEXIÓN		TRACCIÓN	
		P1	P2	P1	P2	P1	P2
17/04/12 (Preparación)	M1						
	M2						
20/04/12 (3 días)	M1	2,46	2,39				
	M2	2,43	2,43				
24/04/12 (7 días)	M1	2,43	2,38	9,18	9,67		
	M2	2,4	2,45	10,15	9,89		
07/05/12 (Preparación)	M3						
	M4						
10/05/12 (3 días)	M3	2,42	2,41				
	M4	2,45	2,5				
14/05/12 (7 días)	M3	2,43	2,4	10,17	10,34		
	M4	2,46	2,47	10,25	10,1		
15/05/12 (28 días)	M1	2,41	2,43	9,5	9,6	2,4	2,41
	M2	2,43	2,41	9,73	9,48	2,45	2,4
04/06/12 (28 días)	M3	2,4	2,44	9,95	10	2,4	2,42
	M4	2,46	2,46	9,88	10,04	2,42	2,46

Día 17/04

Preparación de las mezclas M1 (0g de fibras de acero), M2 (300g de fibra de acero). En primer lugar se realizó el pesado de todos los componentes. Seguidamente se realizó la mezcla en una hormigonera de 30L de capacidad. La grava y la arena se hallaban muy mojadas ya que se encontraban al intemperie y había llovido. Por lo tanto a la hora de añadir el agua a la mezcla no se utilizó toda la calculada.

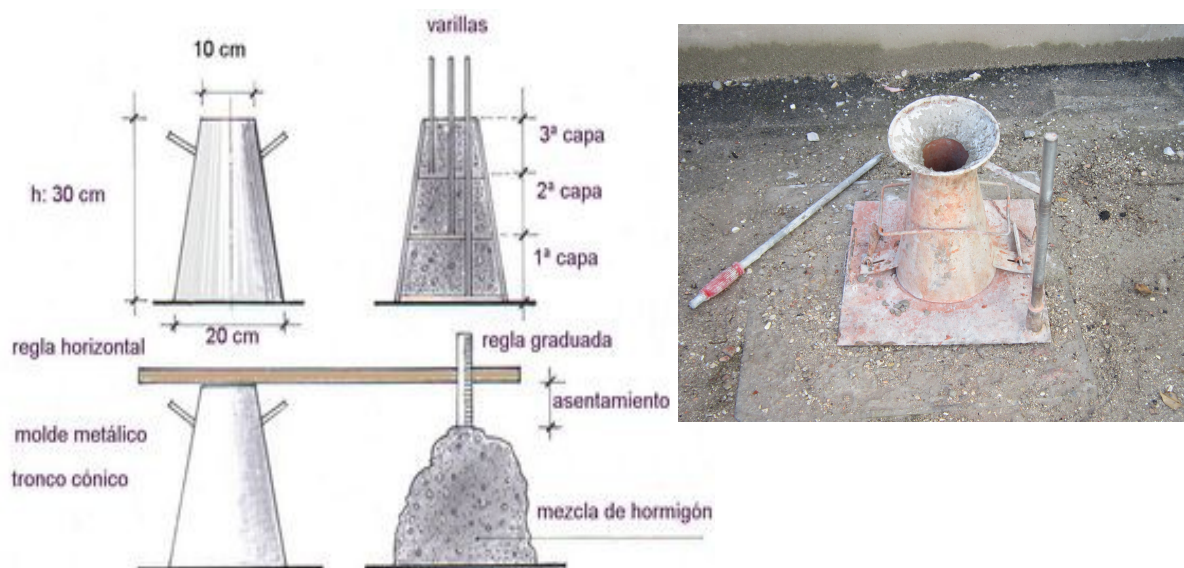


- 1- Primero se colocara la grava
- 2- Seguidamente la arena
- 3- Cemento
- 4- Agua no toda
- 5- resto de agua con el superfluidificante mezclado. En nuestro caso no se añadió toda el agua ya que la grava y la arena estaban muy mojadas.

Figura 3.4.1 Preparación del hormigón en la Hormigonera

Ensayo Cono de Abrams.

A continuación se observa la realización del ensayo del Cono de Abrams, para el conocimiento de la consistencia del hormigón que estamos fabricando con respecto al que deseamos.



M1 → 7,5 litros menos de agua.

→ Cono de Abrams → 1ª prueba= 20 cm

→ 2ª prueba= 22 cm



Figura 3.4.2 Ensayo Cono de Abrams M1

M2 → 2,5 litros menos de agua

→ Cono de Abrams → 1ª prueba= 22cm



Figura 3.4.3 Ensayo Cono de Abrams M2

Vibrado de las probetas

Se trata de un vibrado ligero, ya que estamos hablando de una consistencia fluida; también podría ser picado con barra. Después del vibrado y relleno de las probetas, éstas las envolveremos con papel transparente para que no se evapore el agua (una forma de curado).



Figura 3.4.4. Vibrado de probetas

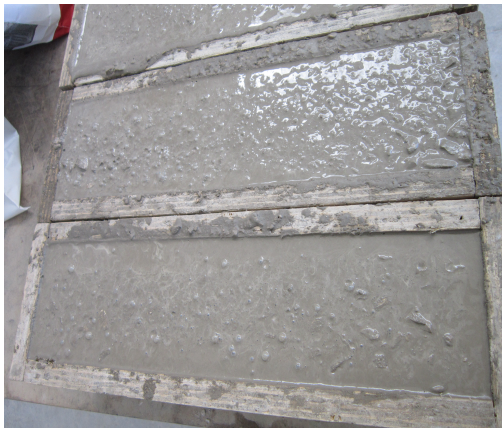


Figura 3.4.5. Relleno de las probeta



Figura 3.4.6. Tapado de las probetas

Día 07/05

Ejecución de las mezclas M3 (600g de fibras de acero), M4 (1200g de fibras de acero).

Al tener más cantidad de fibras de acero, éstas aportan una considerable pérdida de trabajabilidad por lo tanto se colocará más superfluidificante en la mezcla.

M3 → 1,5 litros menos de agua.

→ Cono de Abrams → 1ª prueba = consistencia seca.

→ 2ª prueba = 21 cm



Figura 3.4.6. Relleno de las probeta

M4 → 1 litro menos de agua, hemos colocado más superfluidificante ya que obtiene más fibras de acero.

Se realizarán Los mismos pasos que hemos descrito anteriormente, en éste caso el vibrado resultó más complicado ya que las probetas no estaban correctamente ejecutadas y unidas por lo tanto al vibrarlas el hormigón se perdía, por lo tanto las probetas quedaban con menos cantidad de “agua”.

3.6. ENSAYO A COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión es el máximo esfuerzo que un material rígido puede resistir bajo compresión longitudinal. No es necesario el esfuerzo en el punto de rotura, pero es de significación en materiales que quebrantan bajo una cierta carga. El ensayo es meramente lo contrario del de tensión con respecto a la dirección o el sentido del esfuerzo aplicado.

El ensayo a compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación. En la mayoría de los casos se realiza con hormigones y metales, aunque puede realizarse sobre cualquier material.

- se suele usar en materiales frágiles
- la resistencia a compresión de todos los materiales siempre es mayor que a tracción.

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, la forma de expresarla es, en términos de esfuerzos, generalmente en Mpa.

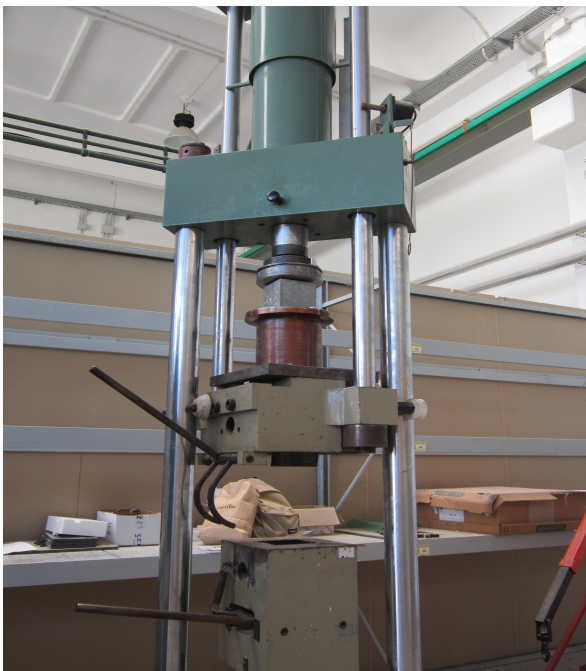


Figura 3.5.1. Prueba de resistencia mecánica de compresión.

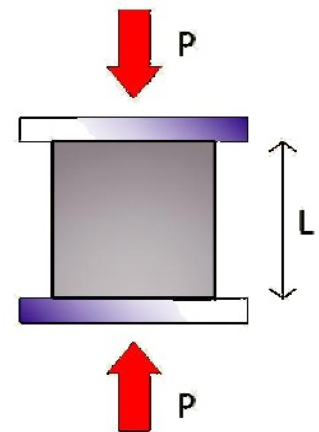
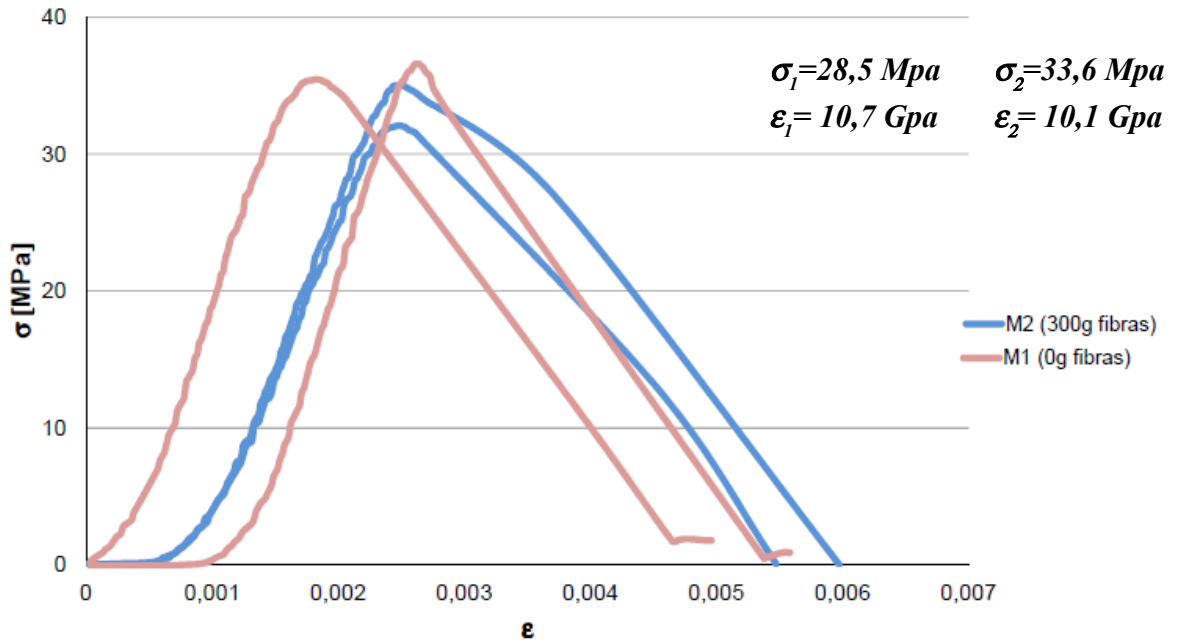


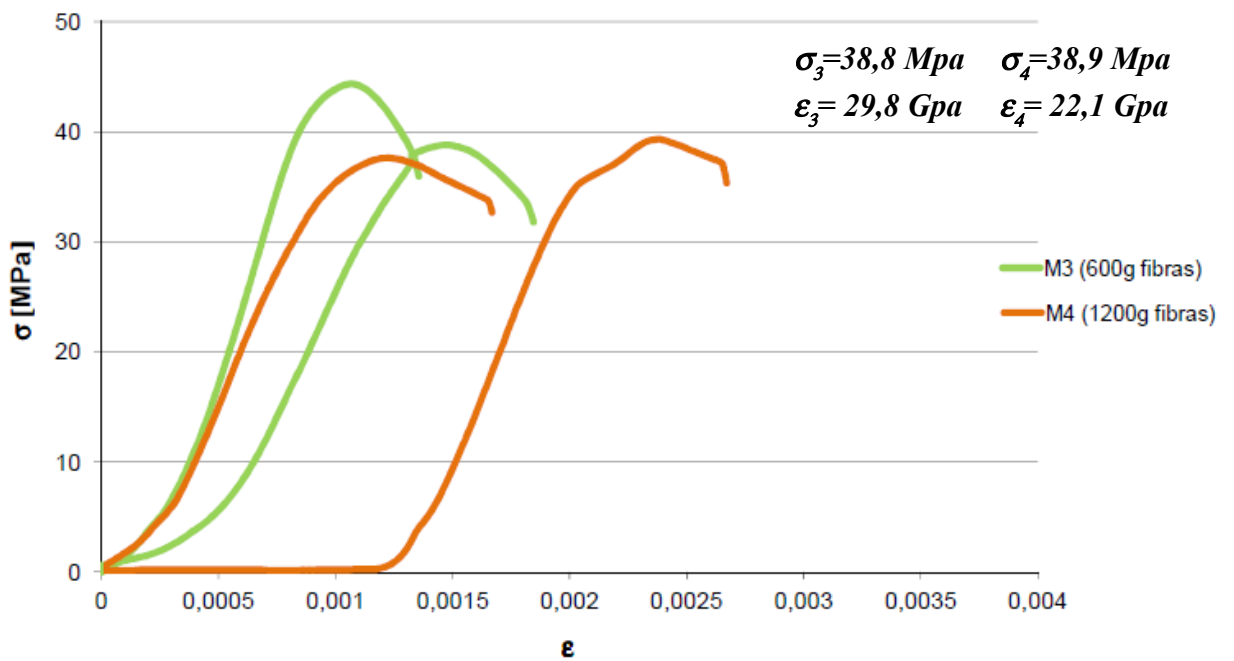
Figura 3.5.2. Probeta rota a compresión

GRAFICAS

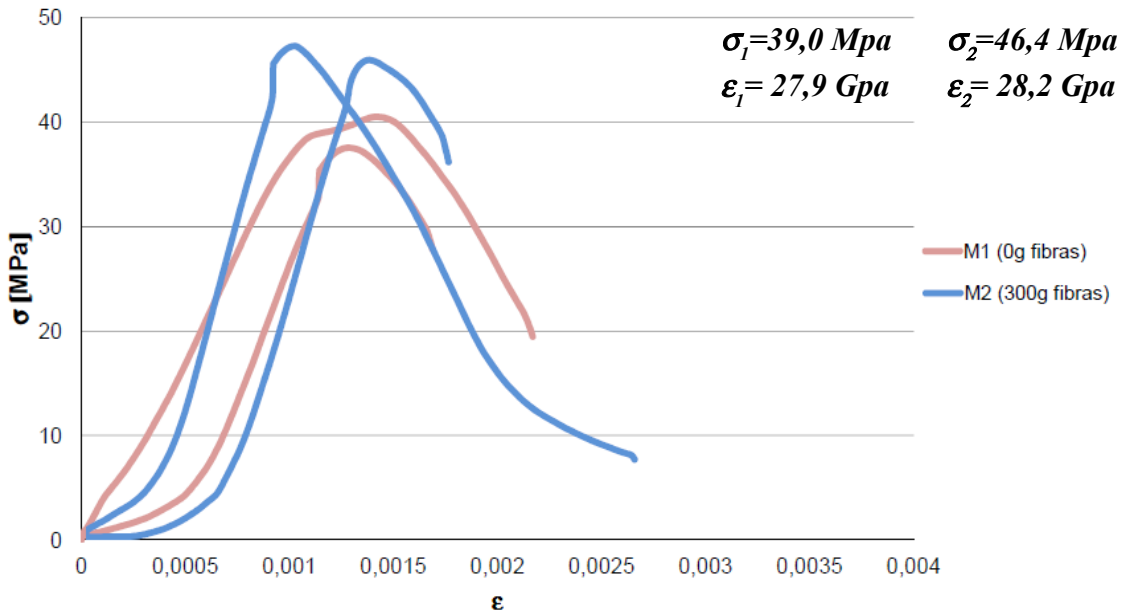
Compresión M1 – M2 (3 días)



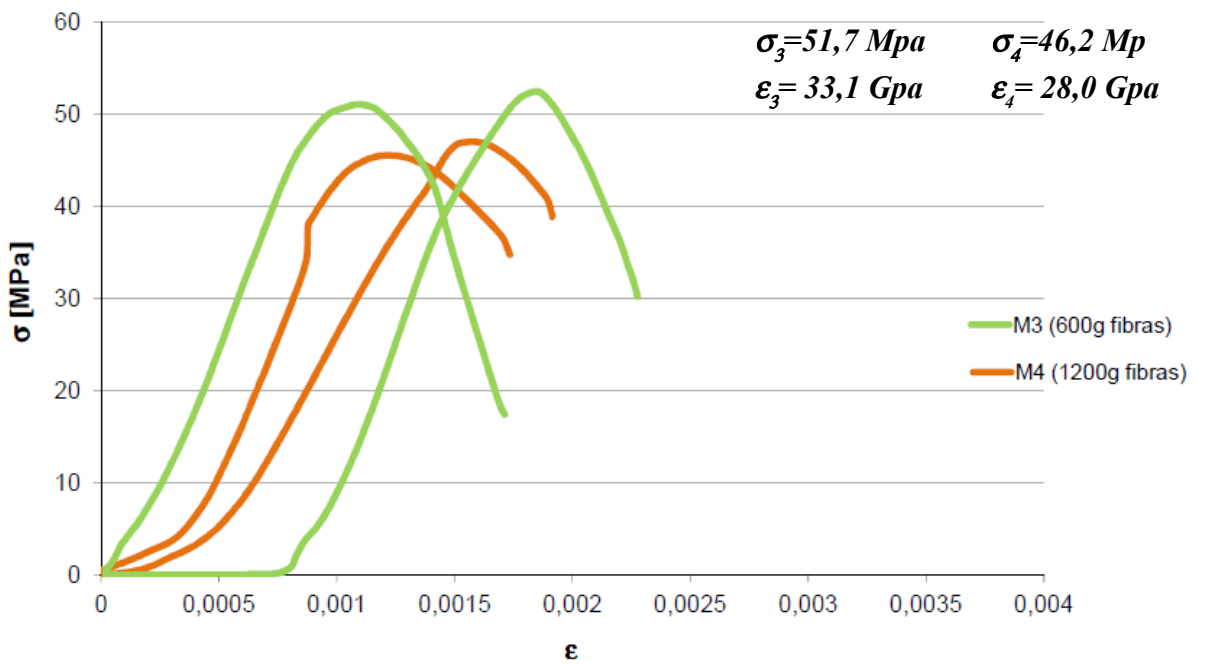
Compresión M3 – M4 (3 días)

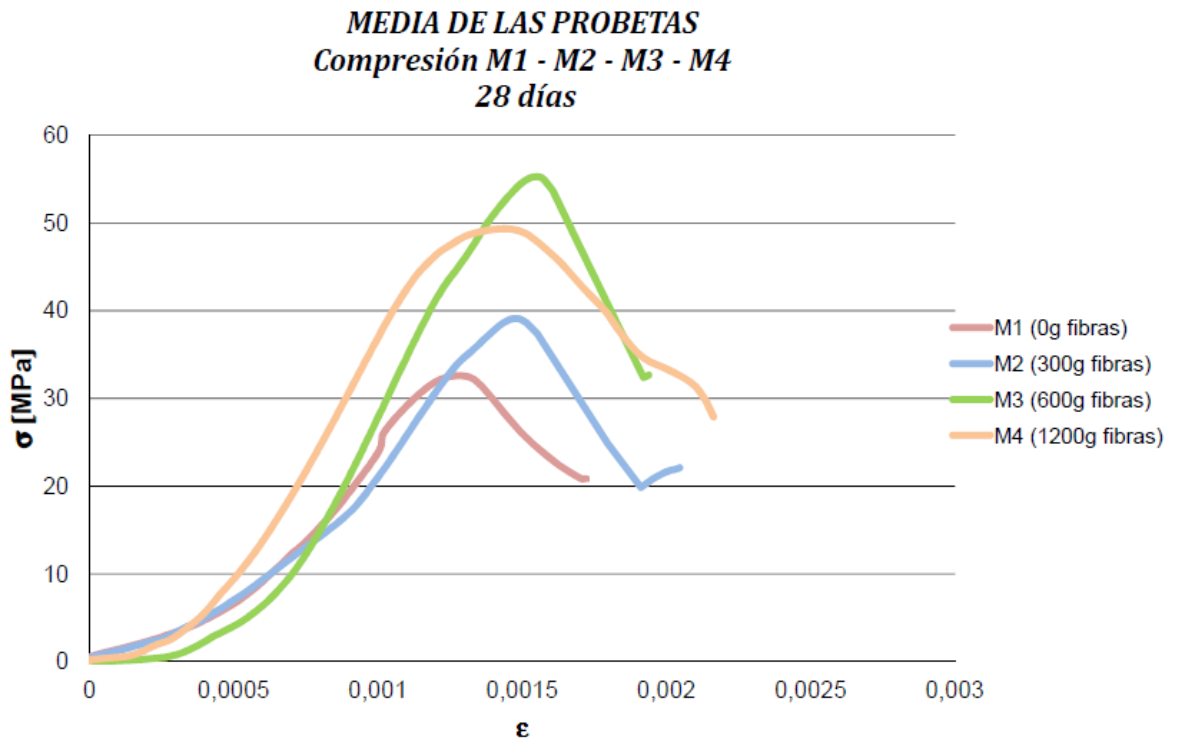


Compresión M1 – M2 (7 días)



Compresión M3 – M4 (7 días)





$\sigma_1=40,4 \text{ Mpa}$	$\sigma_2=49,5 \text{ Mpa}$	$\sigma_3=57,1 \text{ Mpa}$	$\sigma_4=52,6 \text{ Mp}$
$\epsilon_1= 22,5 \text{ Gpa}$	$\epsilon_2= 29,6 \text{ Gpa}$	$\epsilon_3= 28,8 \text{ Gpa}$	$\epsilon_4= 35,1 \text{ Gpa}$

Como podemos observar en la gráfica, las fibras de acero también aportan una resistencia a compresión, aunque seas más importantes y aporten más resistencia a flexotracción.

Por otra parte se observa que aunque la mezcla M4 tiene más cantidad de fibras resiste menos a compresión, esto se debe a que cuanto más fibras tenga la mezcla menos trabajabilidad obtiene; es decir, que cuanto más fibras tenga más cantidad de agua o superfluidificante tendremos que añadir a la mezcla, por lo tanto la resistencia disminuirá a causa del añadido de agua.

3.7. ENSAYO A FLEXIÓN

Este es por excelencia el ensayo de caracterización de las propiedades mecánicas del SFRC y en su momento el sustituto del ensayo a tracción directa. En esencia se trata de ensayar un prisma apoyado en dos puntos y con algunas variaciones en función de la normativa empleada y de lo que se pretenda obtener. Este ensayo presenta el inconveniente de que no resulta adecuado para evaluar hormigones de estructuras ya existentes, debido a la dificultad de obtener probetas de la geometría y dimensiones requeridas.

Los ensayos más empleados son:

- UNE-EN 14651: 2007+A1:2008/// Italia: UNI EN 12390-5:2009
- NBN B 15-238
- UNI 11039-2
- JCI-SF4
- ASTM C1609/C1609M-07
- ASTM C1399/C1399M-10

Los principales parámetros que varían entre los diferentes procedimientos son:

- Dimensiones de los elementos a ensayar.
- Distancia entre apoyos.
- Sistema de carga (centro de luz o a tercios)
- Control del ensayo (flecha y/o abertura de fisura).

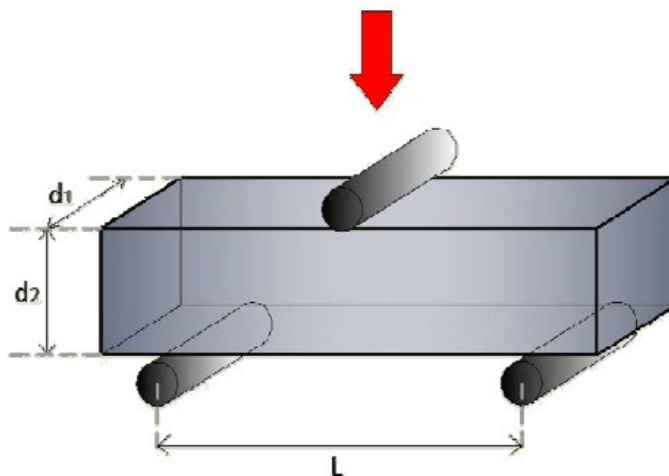

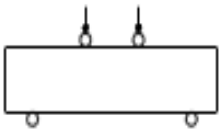

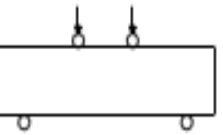
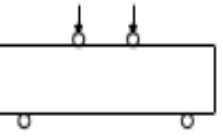



Figura 3.6.1. Probeta rota a flexión

Tabla 2.3. Comparación de las variables más significativas para los ensayos de flexotracción.

Ensayo	Esquema	Principales parámetros
UNE-EN 14651		<ul style="list-style-type: none"> - 150x150x550-700 mm - Luz= 500 mm - Entalla. - Abertura de fisura o flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias residuales.
NBN B 15-238		<ul style="list-style-type: none"> - 150x150x600-750 mm - Luz= 450 mm - Flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Tenacidad.
UNI 11039-2		<ul style="list-style-type: none"> - 150x150x600 mm - Luz=450 mm - Entalla. - Abertura de fisura o flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Índices de ductilidad.
JCI-SF4		<ul style="list-style-type: none"> - 100x100x350 mm ($l_f \leq 40$ mm) - Luz=300 mm - 150x150x 500 mm ($l_f > 40$ mm) - Luz=450 mm - Flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias equivalentes. - Tenacidad.
ASTM C1609		<ul style="list-style-type: none"> - 100x100x350 mm - Luz=300 mm - 150x150x500 mm - Luz=450 mm - Flecha. - Resistencia de primera fisura. - Resistencias residuales. - Tenacidad.
ASTM C1399		<ul style="list-style-type: none"> - 100x100x350 mm - Luz=300 mm - Flecha. - Precarga sobre placa acero. - Recarga sin placa. - Resistencia residual media (ARS)

El método está concebido para fibras metálicas con longitud no superior a 60mm; también puede ser empleado para combinaciones de fibras metálicas y combinaciones de fibras metálicas con otro tipo de fibras. Este ensayo no se debe emplear para hormigones con tamaño máximo de árido mayor que 32mm.

La resistencia a flexión se obtiene empleando la siguiente expresión:

$$f_{Rj} = \frac{3 \cdot F_j \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2}$$

Donde:

$f_{R,j}$: resistencia residual a flexión (MPa).

L : distancia entre apoyos (mm).

b : ancho de la probeta (mm).

h_{sp} : distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en la sección de centro de vano (mm).

F_j : carga correspondiente a valores de CMOD de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm, para valores de j de 1, 2, 3 y 4, respectivamente (Figura 2.10).

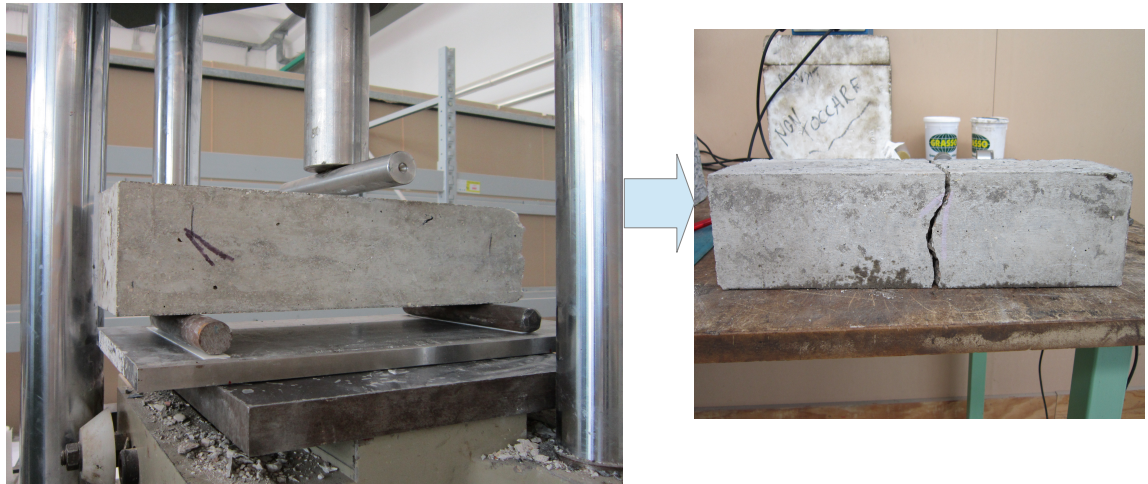


Figura 3.6.2. Probeta M1 (sin fibras de acero) rota a flexión.

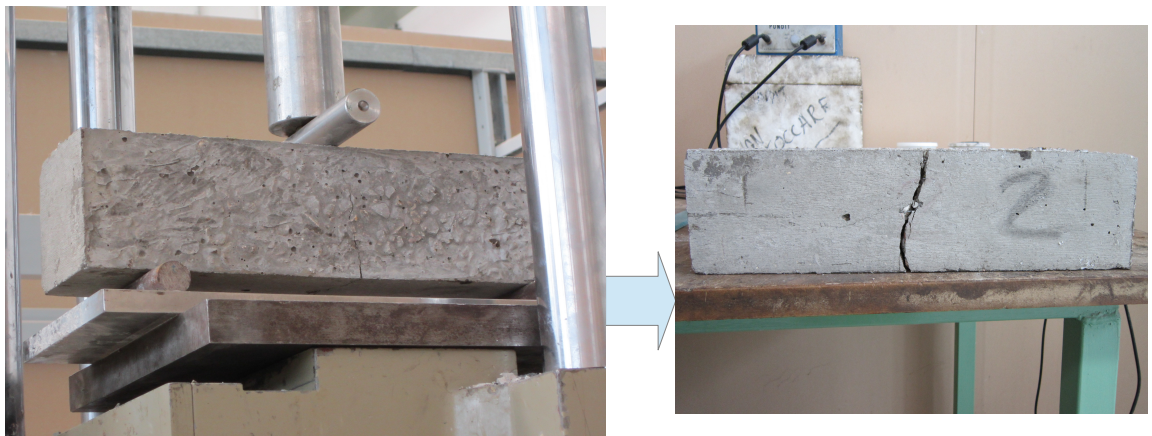


Figura 3.6.3. Probeta M2(300g fibras de acero) rota a flexión

Como se puede observar la viga de M1 y M2 se separan completamente en dos piezas, aunque la M2 le cuesta un poco más ya que tiene un porcentaje de fibras de acero.



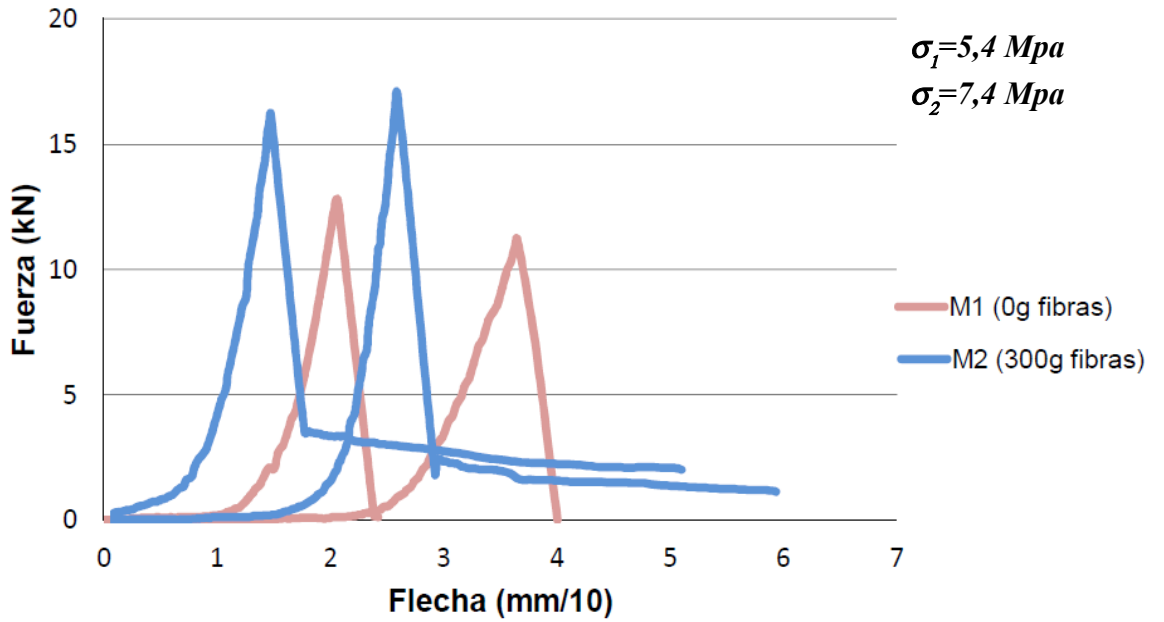
Figura 3.6.4. Probeta M3(600g fibras de acero)rota a flexión



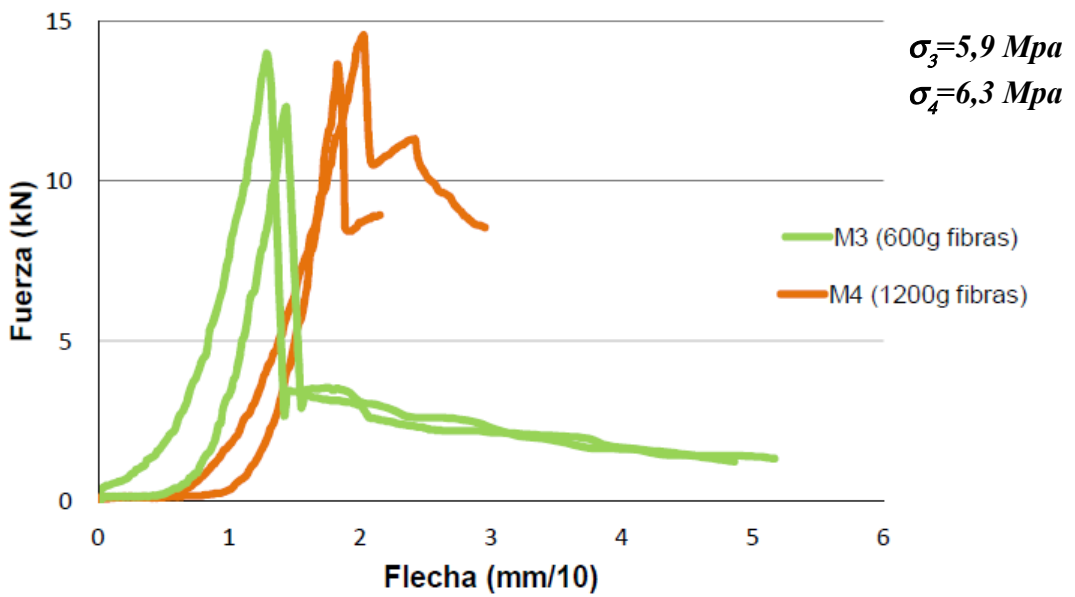
Figura 3.6.5. Probeta M4(1200g fibras de acero)rota a flexión

Aparentemente la viga de la mezcla M4 tiene un comportamiento más dúctil, ya que posee un porcentaje más alto de fibras.

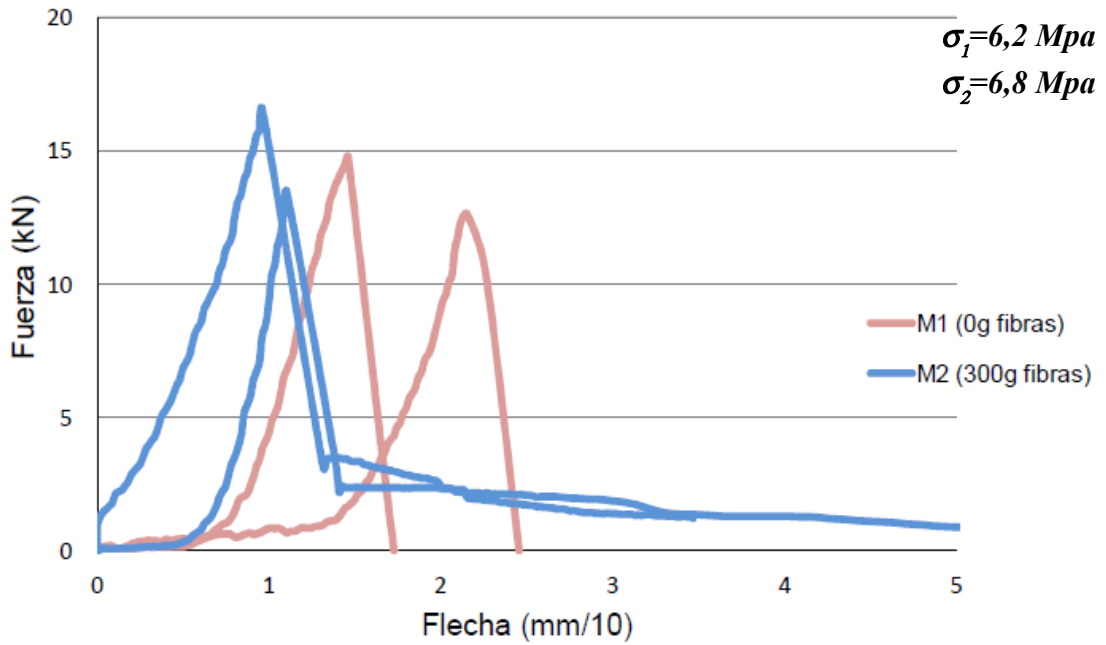
Flexión M1 – M2 (7 días)



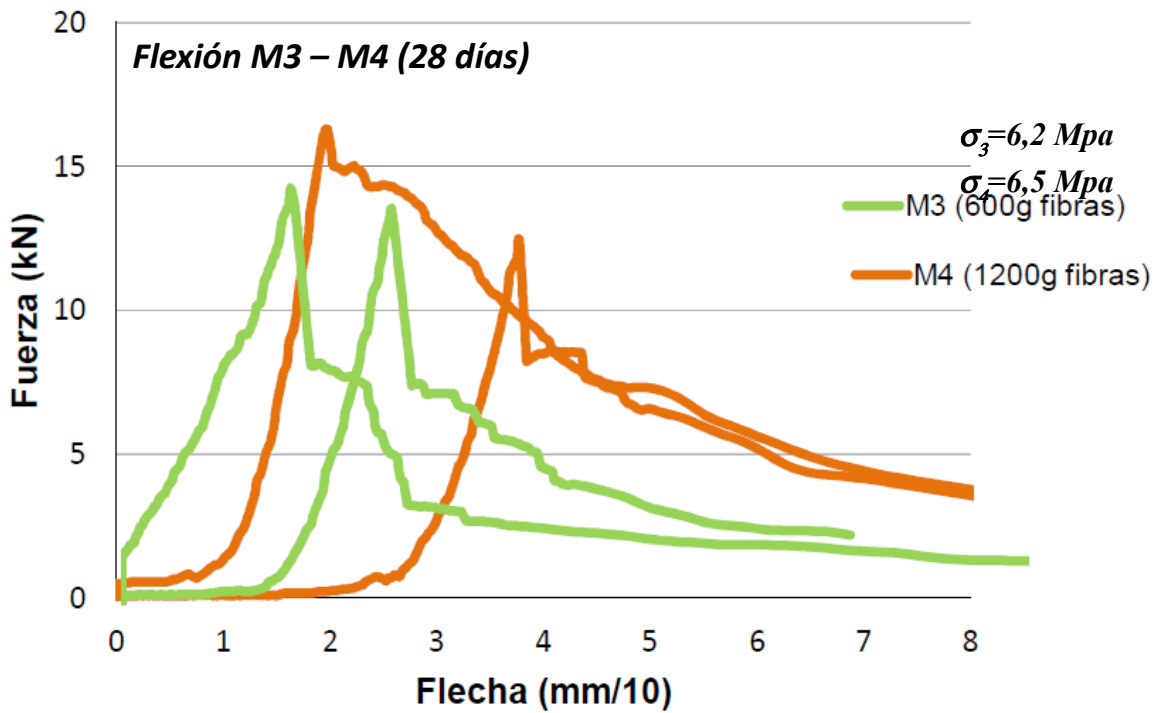
Flexión M3 – M4 (7 días)



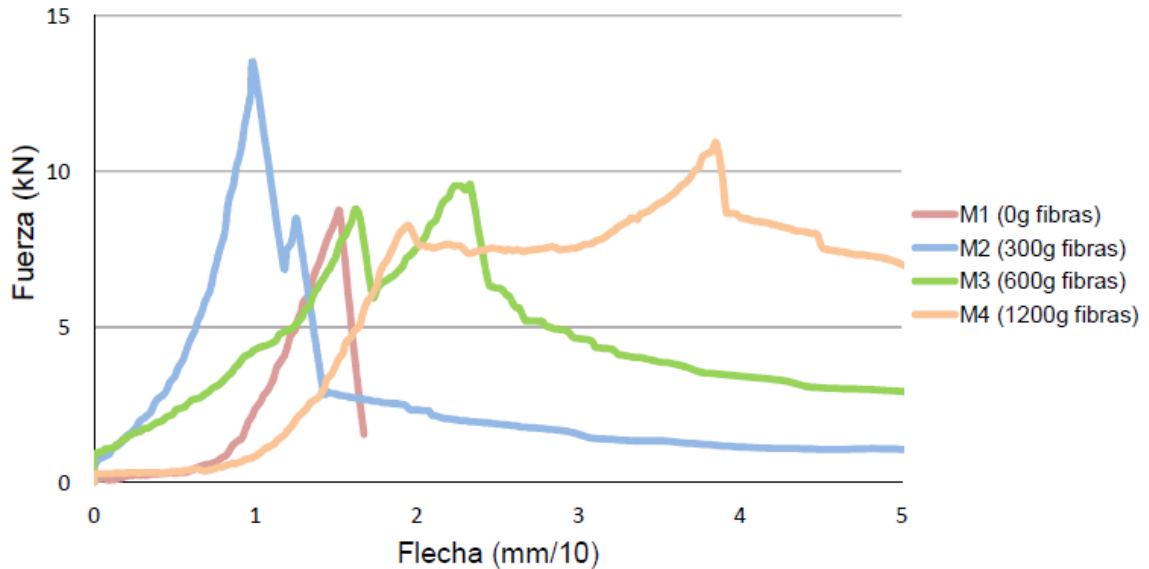
Flexión M1 – M2 (28 días)



Flexión M3 – M4 (28 días)



MEDIA DE LAS PROBETAS
Flexión M1 - M2 - M3 - M4
28 días



Como podemos observar la mezcla que tiene más cantidad de fibras de acero tiene un comportamiento más dúctil, es decir, no se produce una rotura inmediata, sino que sufre una cierta deformación antes de la rotura inminente.

Las mezclas M1-M2 tienen un comportamiento frágil. No obstante se observa en la gráfica, la curva M2 que tiene un porcentaje bajo del 10% de fibras de acero, aunque sufre un comportamiento frágil en un principio después se produce una cierta recuperación y una deformación.

La mezcla M4 que es la que posee más cantidad de fibras de acero, se observa que su límite elástico aumenta a causa de éstas; también se observa una mayor deformación y resistencia que las demás. Por otra parte la mezcla M4 también se podría decir que tiene una mayor tenacidad ya que el área comprendida bajo la curva parece ser la mayor.

3.8. ENSAYO A TRACCIÓN (ensayo Brasileño)

El ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a tracción indirecta de probetas cilíndricas sometiéndolas a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud, en consecuencia, el resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta se rompa a tracción.

Aunque el ensayo está previsto efectuarlo sobre probetas cilíndricas, la norma también prevé la posibilidad de llevarlo a cabo con probetas prismáticas o cúbicas.

El valor obtenido para la tracción indirecta mediante el ensayo brasileño es algo mayor que el correspondiente a la tracción axial.

El hormigón tiene que estar endurecido y curado, y romper las probetas a los 28 días.

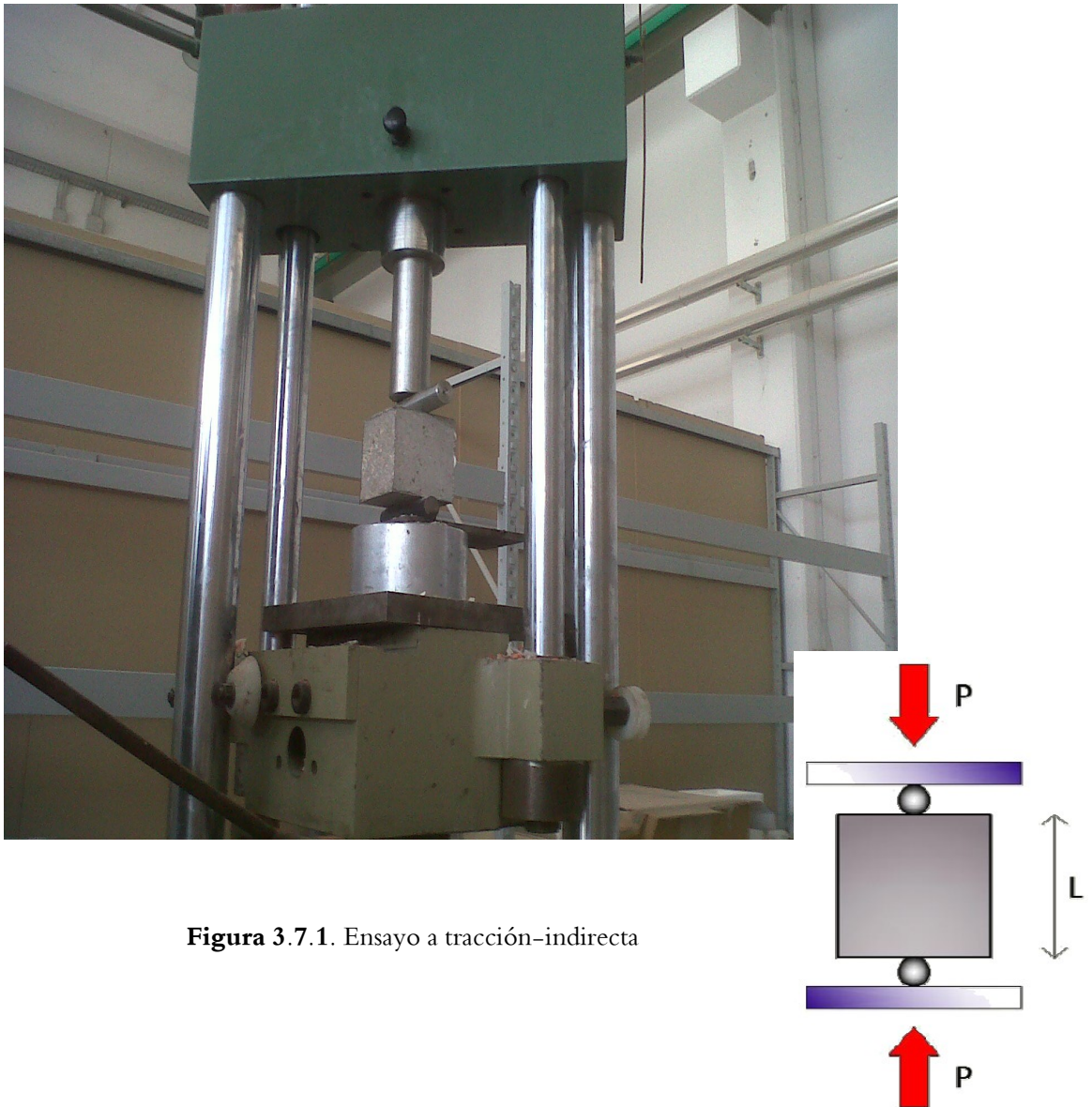


Figura 3.7.1. Ensayo a tracción-indirecta

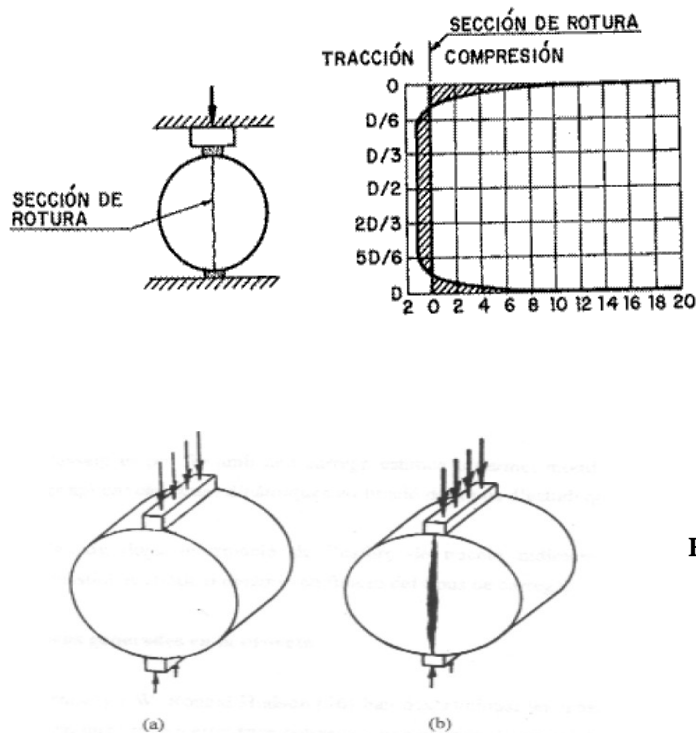


Figura 3.7.1. Probeta rota a tracción-indirecta

Se trata de un ensayo para hallar una aproximación de la resistencia a tracción uniaxial del material. Dicho ensayo consiste en aplicar una carga externa de compresión uniforme a lo largo de dos líneas o generatrices opuestas hasta alcanzar la rotura en muestra cilíndrica o cúbica, en nuestro caso. Las reacciones de la carga y del apoyo forman dos fuerzas concentradas diametralmente opuestas que producen una distribución uniforme de tracciones transversales a lo largo del eje de carga, causando en consecuencia una rotura a tracción de la muestra.

Tradicionalmente se ha considerado un ensayo inapropiado para el hormigón con fibras por 3 razones. El área de carga para grandes deformaciones (en el estado de post-fisuración de HRF) aumenta continuamente conduciendo a un incremento en la carga incluso después de la figuración de la matriz. Además, el ensayo es inestable bajo el control de desplazamiento y la considerable longitud de las muestras permite a la fisura iniciarse dentro de ella, con lo que dificulta la medición de la apertura de fisura y el control de estabilidad. Por este motivo se han producido modificaciones en el ensayo.

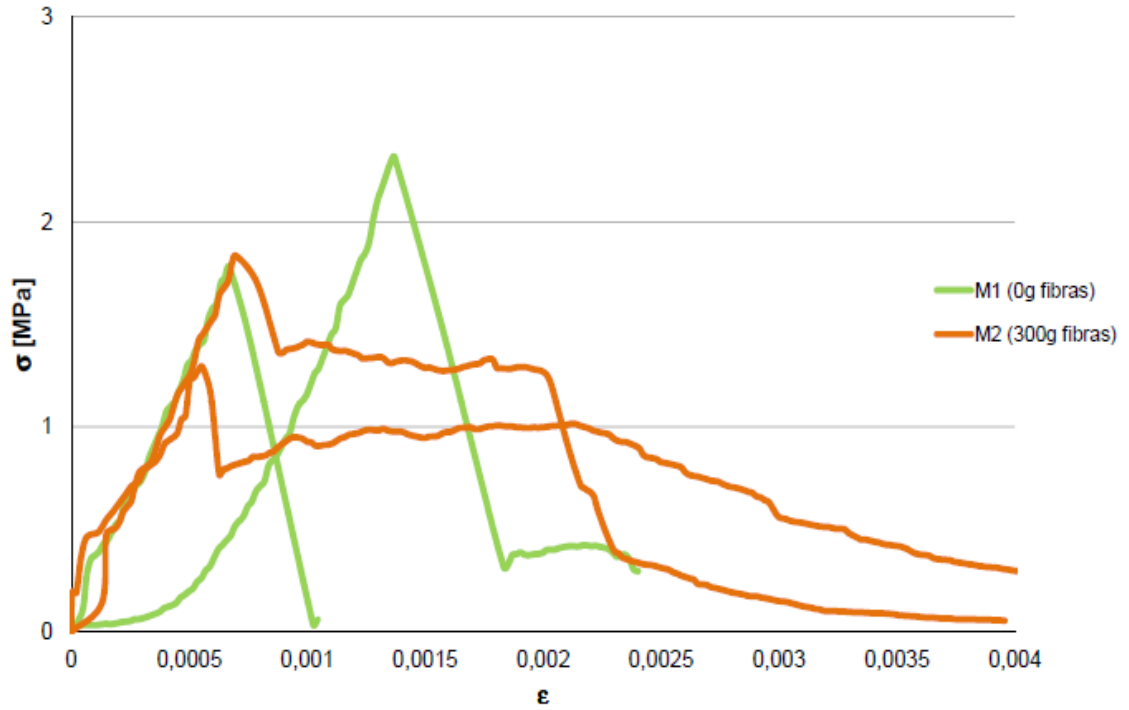
La primera mejora que aparece consiste en limitar el área de la carga a una anchura constante mediante barras metálicas de carga entre los patos de la prensa.

La segunda consiste en medir el desplazamiento transversal y usarlo como la variable de control. Cuando esto es medido a lo largo del plano de fisura se puede utilizar como el desplazamiento de la apertura de la fisura. La reducción de la longitud de la muestra ayuda también para obtener un control estable del ensayo.

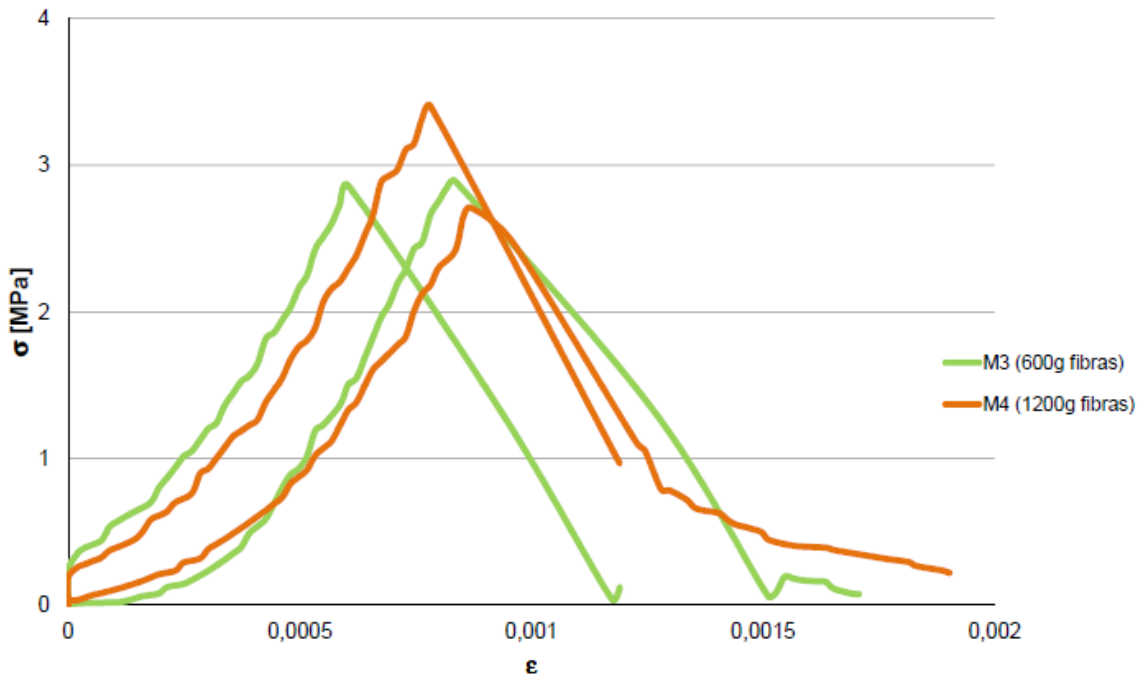
Formula para obtener la resistencia a tracción →
en probetas cúbicas

$$R_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot L^2}$$

Tracción Indirecta M1 – M2 (28 días)



Tracción Indirecta M3 – M4 (28 días)



3.9 CONCLUSIÓN

La finalidad de ésta tesis (análisis experimental del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero), era observar, estudiar el comportamiento mecánico del hormigón reforzado, principalmente la resistencia a tracción y a flexión ya que es dónde el hormigón más debilidad tiene.

Se ha llegado a la conclusión de que las fibras de acero pueden trabajar estructuralmente pero no sustituyen al acero convencional en la mayoría de sus aplicaciones.

Se ha observado que las fibras de acero aportan mucha ductilidad al material ésto hace que resistan bien a las fuerzas de tracción y flexión, que a la hora de romperse siga un comportamiento correlativo, es decir, que no tengan una rotura frágil, que se pueda intervenir antes de la rotura total.

Como tienen rotura a flexotracción dúctil, aumentan mucho la tenacidad e igualmente mejoran de manera considerable la resistencia a la fatiga.

En el diagrama tensión-deformación a tracción directa del SFRC, las fibras rigidizan sensiblemente la respuesta en fase de pre-fisuración respecto de la de un hormigón tradicional y, de forma destacada, aportan una capacidad de resistencia residual post-fisura debida el efecto de cosido entre las dos caras de la fisura. Por lo que, en el caso de terremotos, disminuyen los daños sobre las mismas.

La carbonatación y otras características que influyen en la durabilidad de los hormigones, no se ven afectados por las fibras de acero.

Para finalizar, se puede decir que las fibras de acero dotan de mayor resistencia a tracción y a flexión al hormigón, las fibras de acero pueden trabajar estructuralmente pero no sustituyen al acero convencional en la mayoría de sus aplicaciones.

4.0 BIBLIOGRAFÍA

1. Libro Mix-Design Calcestruzzo Fibroriforzato.
2. Moriconi Giacomo - Universita Politecnica delle Marche. *Multifunctional Opportunity from Sustainable Building Materials*. VIII INSTM CONFERENCE, Catania, 26-29 Giugno 2011.
3. Anejo 14 de la EHE-2008, "Recomendaciones para la utilización de hormigones con fibras".
4. CNR_DT204-2006-1, Normativa italiana del hormigón reforzado con fibras de acero.
5. Jornadas Técnicas, aplicación de la nueva EHE-08 en la fabricación del hormigón, Málaga, 24 septiembre de 2009.
6. <http://www.bekaert.com/es-MX/Product%20Catalog/Products/D/Dramix%20steel%20fibras%20for%20concrete%20reinforcement.aspx>
7. Mix design of steel fiber reinforced concrete, Eduardo Moreno Almansa y Manuel Fernández Cánovas, madrid.
8. UNE 83.314, "Ensayos del Hormigón. Medida de la Consistencia del Hormigón Fresco. Método VeBe".
9. "Concreto reforzado con fibras" Editado por el Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto. Vol13, febrero 2007.
10. Plizzari Giovanni - Universita di Brescia. Aspectti normativi ed applicazioni strutturali con il calcestruzzo fibrorinforzato. Estratto conferenza, 9/04/2011.

11. UNE 83.501, "Hormigones con Fibras. Toma de Muestras de Hormigón Fresco".
12. UNE 83.502, "Hormigones con Fibras. Fabricación en Laboratorio".
13. UNE 83.504:2004, "Hormigones con Fibras. Fabricación y Conservación de Probetas para los Ensayos de Laboratorio".
14. UNE 83.507:2004, "Hormigones con Fibras. Rotura por Compresión".
15. UNE 83509:2004, "Hormigones con Fibras. Rotura por Flexotracción".
16. UNE 83510:2004, "Hormigones con Fibras. Determinación del Índice de Tenacidad y Resistencia a Primera Fisura".
17. UNE 83.512-1, "Hormigones con Fibras. Determinación del Contenido de Fibras de Acero".
18. Tesina : Analisi sperimentale del comportamento di calcestruzzo fibrorinforzato, Gioia Palazzi.