

# Fundamentos de hormigón **REFORZADO CON FIBRAS**



Jaime C. Gálvez  
Marcos G. Alberti  
Alejandro Enfedaque  
Álvaro Picazo



El hormigón tiene una larga tradición como material de construcción, que se remonta al imperio romano con el *opus caementicium*. Su versión moderna tiene inicio con el desarrollo del cemento Portland, cuya primera patente, obtenida por Joseph Apsdin, data de 1824. Su gran desarrollo como material estructural se produce en la segunda mitad del siglo pasado, constituyendo en la actualidad el material de construcción con mayor volumen de producción, con una producción mundial anual cercana a los 30.000 millones de toneladas.

Como es bien sabido, el hormigón tiene un buen comportamiento a compresión, pero es un material de comportamiento frágil y limitada resistencia a la tracción. Con el fin de mejorar estas debilidades, el hormigón se refuerza con armadura pasiva (hormigón armado) y armadura activa (hormigón pretensado o postesado). La incorporación de fibras al hormigón, que pueden sustituir parcial o totalmente el refuerzo de acero, permite incrementar y mejorar tanto su ductilidad como su resistencia a tracción y flexo-tracción. Esta técnica que se ha desarrollado desde los años sesenta del siglo XX, ha sufrido un importante auge en los últimos años con la aparición y desarrollo de nuevas fibras, tanto por su material como por su tipología, lo que se ha plasmado en una creciente aplicación tanto en la ingeniería civil: pavimentos, losas, dovelas y revestimientos de túneles, etc., como en la edificación: paneles de fachada, marquesinas, cerramientos, viseras de estadios, etc. Además, la vigente Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 recoge en su Anejo 14 las “Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras”.

Las asignaturas comunes dedicadas al diseño y cálculo de hormigón de los Planes de Estudio de las titulaciones conducentes a la habilitación para el ejercicio profesional como Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Arquitecto y Arquitecto Técnico abordan de manera muy somera el estudio del hormigón reforzado con fibras por tratarse de un tema que requiere cierta especialización. Este aspecto se ve agravado porque los libros clásicos de hormigón apenas hacen referencia a su existencia. Con la incorporación de asignaturas optativas en los nuevos planes de estudio se ha dado mayor espacio a los temas de especialización, como es el caso de las asignaturas de “Hormigones Especiales y Materiales de Refuerzo” y “Durabilidad e Innovación en Materiales de Construcción”, que se imparten en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid. Además, progresivamente sería conveniente tener en cuenta las posibilidades del hormigón reforzado con fibras en las asignaturas relacionadas con el diseño y el proyecto de estructuras, tanto en ingeniería civil como en edificación. En la actualidad no hay un texto que facilite una visión global del hormigón reforzado con fibras, los tipos de fibras y los aspectos normativos de cálculo estructural.

Este libro tiene como objetivo facilitar el uso y diseño de los hormigones reforzados con fibras de acuerdo a la EHE-08. Se inicia con una introducción a las fibras para el hormigón (Capítulo 1), a continuación se presentan los aspectos relacionados con el hormigón reforzado con fibras de acero (Capítulo 2), con fibras macro-sintéticas estructurales (Capítulo 3), con micro-fibras de polipropileno (Capítulo 4) y con fibras de vidrio (Capítulo 5). Se completa con un capítulo dedicado a la normativa para el uso estructural del hormigón con fibras (Capítulo 6) y dos ejemplos de cálculo de hormigón reforzado con fibras (Capítulo 7). En este sentido, cabe destacar que la vigente Instrucción de Hormigón Estructural mencionada, la EHE-08, será previsiblemente sustituida por el Código Estructural en cuyo momento se actualizará esta edición del libro.

Madrid, julio de 2019

Los autores



<b>Prólogo .....</b>	<b>1</b>
<b>Índice .....</b>	<b>3</b>
<b>1. Fibras para hormigón .....</b>	<b>5</b>
1.1 Introducción .....	5
1.2 Generalidades .....	7
1.3 Propiedades de las fibras .....	8
1.4 Respuesta Estructural de los hormigones reforzados con fibras .....	8
<b>2. Hormigón reforzado con fibras de acero .....</b>	<b>11</b>
2.1 Las fibras de acero como refuerzo del hormigón .....	11
2.2 Aplicaciones .....	12
2.3 Dosificación .....	13
2.4 Propiedades mecánicas .....	13
2.5 Aportación de las fibras al cálculo estructural con Uso estructural del HRFA .....	14
2.6 Otras propiedades .....	15
<b>3. Hormigón reforzado con fibras macro-sintéticas estructurales .....</b>	<b>17</b>
3.1 Fibras macro-sintéticas estructurales .....	17
3.2 Aplicaciones .....	18
3.3 Características de las fibras .....	18
3.4 Propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras macro-sintéticas estructurales .....	19
3.5 El refuerzo estructural con fibras macro-sintéticas estructurales .....	19
3.6 Otras propiedades .....	21
<b>4. Hormigón reforzado con micro fibras de polipropileno .....</b>	<b>23</b>
4.1 Introducción .....	23
4.2 Aplicaciones .....	24
4.3 Dosificación .....	25
4.4 Propiedades mecánicas .....	25
<b>5. Hormigón reforzado con fibra de vidrio .....</b>	<b>27</b>
5.1 Introducción y materiales .....	27
5.2 Dosificación .....	28
5.3 Fabricación .....	28
5.3.1 Método de proyección conjunta .....	28
5.3.2 Método de premezclado .....	29
5.3.3 Método de premezclado y proyección .....	29
5.4 Propiedades mecánicas .....	30

5.5 Aplicaciones .....	31
5.6 Caracterización del GRC .....	32
<b>6. Normativa aplicable para uso estructural del Hormigón reforzado con fibras .....</b>	<b>33</b>
6.1 Requisitos estructurales según las normativas .....	33
6.2 Comportamiento a flexión. Modelos constitutivos .....	34
6.2.2 Hormigón reforzado con fibras de poliolefina.....	35
6.3 Comportamiento a cortante .....	37
<b>7. Ejercicios.....</b>	<b>39</b>
7.1 Ejercicio 1.....	39
7.2 Ejercicio 2.....	45
<b>Bibliografía de referencia.....</b>	<b>50</b>

# 1. Fibras para hormigón

## 1.1 Introducción

El uso de fibras como refuerzo de materiales frágiles se remonta a la antigüedad con el uso de paja o crines de caballo para el refuerzo de arcillas en ladrillos o suelos. Sin embargo, fue a principios del siglo XX cuando se desarrolló el concepto moderno de refuerzo con fibras discontinuas y discretas en materiales frágiles como los morteros de cemento y el hormigón. En 1874 A. Bérard patentó en California (Estados Unidos) lo que denominó “mejora de la piedra artificial (*Improvement in artificial stone*)” que proponía añadir a un hormigón residuos de acero. Graham en 1911 utilizó por primera vez fibras de acero para mejorar de la resistencia de un hormigón armado convencional. Por otro lado, entre 1912 y 1927 se desarrollaron varias patentes de cementos reforzados con fibras de vidrio y acero en Francia, Alemania y Estados Unidos.

Fue con la aparición de estudios sobre materiales compuestos en la década de los 50 y, sobre todo, gracias a las investigaciones de Romualdi en 1963 y 1964 junto con Batson y Mandel, respectivamente, cuando la investigación sobre materiales cementicios con adición de fibras, principalmente de acero, tuvieron mayor repercusión y se impulsaron nuevas investigaciones. Paralelamente, Biryukovski en 1964 y Majumdar y Ryder en 1968 desarrollaron las primeras fibras de vidrio y fue en esa década en la que se realizaron las primeras aplicaciones importantes en el ámbito de la ingeniería civil. Aunque el enorme abanico de ventajas del hormigón reforzado con fibras no había sido todavía estudiado, algunas aplicaciones, como el uso de hormigón reforzado con fibras de acero como pavimento resistente a la abrasión, comenzaron a utilizarse de forma habitual.

El desarrollo del hormigón como principal material de construcción en todo el planeta durante la segunda mitad del siglo XX propició el desarrollo de nuevas tendencias en hormigones de altas prestaciones muy competitivos y no limitándose exclusivamente al uso del hormigón armado convencional. La única desventaja mecánica del hormigón es su fragilidad y por ello no sorprende que se hayan desarrollado tantas investigaciones para mejorar su ductilidad y resistencia a tracción por medio de fibras. Es habitual caracterizar un hormigón por su resistencia a compresión y este valor es la referencia más habitual para caracterizar su comportamiento mecánico. Sin embargo, las roturas en el hormigón son frágiles incluso a compresión ya que se produce por las tracciones originadas por la combinación de tensiones de compresión y de tensiones tangenciales. Así pues, mejorar el comportamiento frágil del hormigón es mejorar su resistencia a tracción en los procesos post-fisuración de la matriz en los que la aportación de fibras ha demostrado su mayor contribución. Además, se puede evitar el colapso frágil a compresión.

Evidentemente, esta aportación está ligada a las propiedades mecánicas de la fibra que se encargan de coser las fisuras producidas en el plano perpendicular a las direcciones principales de tracción, pero también a la capacidad de trabajar solidariamente con la matriz del hormigón. Las interacciones fibra – matriz, la adherencia o la forma de anclaje son decisivas para el comportamiento del material compuesto y por ello, además del estudio de diferentes materiales, existen en la bibliografía técnica estudios que analizan gran cantidad de formas y acabados superficiales con objeto de optimizar el comportamiento del material compuesto.

Por otro lado, los requerimientos en seguridad estructural son cada vez más exigentes. Las fibras ofrecen un gran campo de aplicaciones añadidas a los requisitos resistentes frente a solicitudes de tracción o flexión. Así, durante las últimas décadas numerosos estudios han profundizado sobre la influencia de la aportación de fibras de diversos materiales y formas al hormigón para distintas situaciones de proyecto o el posible uso en el cálculo estructural en los Estados Límites Últimos (ELU) o de Servicio (ELS). En este sentido son muy conocidos los usos para controlar la fisuración por la retracción plástica o la abrasión, pero también han sido estudiados los efectos de las fibras en el hormigón frente a fatiga, *spalling*, resistencia al fuego, fluencia, hielo-deshielo, frente a acciones térmicas o en situaciones de proyecto como sismo o impacto. Por supuesto, los requisitos de durabilidad y sostenibilidad son cada vez más importantes, pero también existen estudios para el desarrollo de materiales inteligentes en los que las fibras ofrecen un gran campo de aportaciones y que, en general, combinan una mejora de las propiedades mecánicas con la mejora de varias propiedades añadidas.

Existen aplicaciones en las que se han ido imponiendo fibras de distintos materiales, siendo inicialmente los más habituales el acero y el vidrio además de las naturales o las de amianto. Las fibras vegetales no han permitido la obtención de hormigón estructural de altas prestaciones y el amianto se ha descartado por los efectos nocivos sobre la salud humana. En cuanto a las fibras de vidrio, son muy utilizadas pero presentan importantes problemas de durabilidad ya que la fibra pierde sus propiedades en el medio alcalino del hormigón. Por ello, las fibras de acero son las más utilizadas, gracias además a sus magníficas propiedades mecánicas. A principio de la década de los setenta se comenzaron a emplear fibras de carbono que, junto con el desarrollo de las fibras sintéticas, completan el abanico de materiales en el mercado actual de fibras utilizadas para el refuerzo de hormigón.

Las fibras sintéticas más usuales son las de polietileno, polivinilo, nylon y polipropileno. Estas fibras sintéticas presentan algunas ventajas competitivas respecto a las fibras de acero como el menor peso, coste global y la estabilidad química.

Las diferentes investigaciones junto con el desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas al hormigón y el desarrollo de proyectos con requerimientos técnicos muy exigentes, han contribuido al impulso y desarrollo de los hormigones reforzados con fibras. Estas exigencias han aprovechado las ventajas de las fibras a pesar del aumento de coste y dado que las fibras más utilizadas para la construcción y la ingeniería civil han sido las de acero se han establecido ensayos, manuales de diseño y normas para el uso de fibras de acero (ACI, RILEM, ACHE, CNR-DT, DBV, etc.). En la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, que será la normativa de referencia en el presente libro, se definieron los hormigones reforzados con fibras como:

*Los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa.*

*Anejo 14, EHE-08.*

## 1.2 Generalidades

Una clasificación de las fibras podría realizarse en función del material del que se componen. Existen cuatro grandes grupos de fibras para el refuerzo de hormigón. La EHE-08 incluye tres tipologías de fibras según su naturaleza: las fibras de acero, las fibras sintéticas y otras fibras inorgánicas, en referencia a las fibras de vidrio. El Instituto Americano del Hormigón (ACI) en el comité 544 sobre hormigón reforzado con fibras, considera cuatro tipologías de fibras, añadiendo a las anteriores las fibras naturales que tienen una mayor aplicación en países en desarrollo.

Las fibras de acero son las fibras que han sido más usadas tradicionalmente en el refuerzo de hormigón. Su uso es principalmente estructural y se ha estudiado su comportamiento en elementos sometidos a múltiples esfuerzos: flexión, cortante, bajo compresión biaxial, fatiga, fractura, etc. Las fibras de acero en el hormigón mejoran la resistencia a tracción, la resistencia a flexotensión, la resistencia cuando está sometido a altas velocidades de deformación, la resistencia a fatiga, la ductilidad, la tenacidad, etcétera.

En cuanto a las fibras de vidrio hay pocos estudios de los efectos de las fibras de vidrio como adición al hormigón. El uso más común de estas fibras es para la fabricación de mortero de cemento reforzado con fibras de vidrio. Sin embargo, como ya ha quedado expuesto en la literatura, la durabilidad de estas fibras en los entornos alcalinos es reducida.

Entre las fibras más comunes se encuentran también las de carbono (FC), polipropileno (PP) o polivinil alcohol (PVA). Los campos de aplicación son numerosos ya que hay un gran abanico de polímeros usados en la fabricación de fibras. Tradicionalmente han tenido una mayor aplicación las fibras de polipropileno. Estas fibras se caracterizan por tener un bajo módulo de elasticidad y su función principal es la de soportar las tensiones generadas por la retracción. Se utilizan también para aumentar la resistencia del hormigón al fuego. Las propiedades mecánicas de los hormigones reforzados con fibras de polipropileno han sido estudiadas con detenimiento, obteniéndose que la resistencia a compresión no sufre apenas variaciones y que el comportamiento en rotura del hormigón cambia, aumentando su ductilidad. Así pues, su adición no comporta una mejora notable de las propiedades resistentes del hormigón. Dentro de las fibras sintéticas, recientemente se han desarrollado las fibras poliméricas de altas prestaciones mecánicas y con tratamientos superficiales que las hacen adecuadas para su uso estructural sirviendo como ejemplo las fibras de poliolefina.

En lo que se refiere a la adición de fibras naturales al hormigón, ésta se realiza principalmente en países en vías de desarrollo. Las fibras naturales (agave, coco) tienen un campo de aplicación reducido debido a sus limitadas propiedades mecánicas y a los problemas de durabilidad que sufren.

La primera variable, añadida al material de qué estén hechas, es la cantidad de fibras que es efectiva para de cada tipo de ellas. Por debajo de determinada cuantía, la acción de las fibras no es apreciable y si se superan determinados umbrales, el hormigón puede no ser trabajable o, incluso, no poderse realizar una mezcla correcta. Los contenidos altos en fibras pueden necesitar técnicas operacionales específicas y, en todo caso, condicionan el amasado y los métodos de compactación y/o puesta en obra para asegurar una buena calidad del material resultante. Como es lógico, la respuesta estructural mejora con el incremento de la fracción volumétrica de fibras añadida aportando ductilidad y tenacidad al hormigón ya endurecido. Sin embargo, la disminución de la docilidad en estado fresco puede acarrear futuros problemas de durabilidad. En el caso de los hormigones con fibras de acero es conocido que los entornos alcalinos que se van a encontrar en la matriz de pasta de cemento protegen a las mismas frente a la corrosión.

En los últimos años, el desarrollo de nuevos tipos de macro fibras sintéticas con propiedades mecánicas mejoradas ha permitido su uso en aplicaciones estructurales añadiéndolas a diferentes tipos de hormigón. El comportamiento mecánico de éstos se aproxima al comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero siendo necesarios pesos de fibras más reducidos. Además, al estar fabricadas con materiales poliméricos basados en poliolefinas, se ha conseguido que sean estables químicamente en multitud de entornos y frente a gran variedad de sustancias agresivas.

## 1.3 Propiedades de las fibras

Las propiedades mecánicas de las fibras en relación a las de la propia matriz cementicia son determinantes para el comportamiento del material compuesto. En la Tabla 1 se muestran las propiedades más usuales de una gran variedad de fibras.

Tabla 1. Propiedades habituales de diferentes tipos de fibras. Adaptada de: (Nawy, 2008).

<b>Tipo de Fibra</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Densidad relativa</b>	<b>Resistencia a tracción (GPa)</b>	<b>Módulo de elasticidad (GPa)</b>	<b>Alargamiento de rotura (%)</b>
Acrílica	0,02-0,35	1,1	0,2-0,4	2	1,1
Asbesto	0,0015-0,02	3,2	0,6-1,0	83-138	1-2
Algodón	0,20-0,60	1,5	0,4-0,7	4,8	3-10
Vidrio	0,005-0,15	2,5	1,0-2,6	70-80	1,5-3,5
Grafito	0,008-0,009	1,9	1,0-2,6	230-415	0,5-1,0
Kevlar	0,010	1,45	3,5-3,6	65-133	2,1-4,0
Nylon (alta tenacidad)	0,02-0,40	1,1	0,76-0,82	4,1	16-20
Poliéster (alta tenacidad)	0,02-0,40	1,4	0,72-0,86	8,3	11-13
Polipropileno	0,02-0,40	0,95	0,55-0,76	3,5	15-25
Rayón (alta tenacidad)	0,02-0,38	1,5	0,4-0,6	6,9	10-25
Lana de roca	0,01-0,80	2,7	0,5-0,76	---	0,5-0,7
Sisal	0,01-0,10	1,5	0,8	---	3,0
Acero	0,10-1,00	7,85	0,3-2,0	200	0,5-3,5
Poliolefina	0,50-0,10	0,91	0,2-0,6	2,5-20	15-25
<b>Hormigón</b>	---	1,5-2,5	0,003-0,007	10-45	0,02

## 1.4 Respuesta Estructural de los hormigones reforzados con fibras

El hormigón armado es el material estructural más importante en el ámbito de la construcción gracias a que aprovecha la sinergia de los dos materiales, hormigón y acero, en su comportamiento mecánico. Así, si la principal debilidad del primero es su baja resistencia a tracción, el segundo se sitúa en las zonas traccionadas del elemento estructural aportando sus propiedades mecánicas bajo esta solicitud. Durante el siglo XX se ha estudiado la forma de trabajo de este material compuesto, la adherencia entre armaduras y matriz, los planos deformación en rotura que permiten evitar roturas frágiles y, en general, el aprovechamiento máximo de los materiales. Sin embargo, el control de las fisuración mediante barras de acero no es siempre efectivo y, en todo caso, no se consigue evitar la aparición

y propagación de microfisuras lo que es de gran importancia en canales, depósitos o entornos agresivos. Las fibras distribuidas aleatoriamente en la masa del hormigón, si disponen de un anclaje adecuado y sus propiedades y distribución lo permiten, pueden controlar la aparición y propagación de las microfisuras aumentando la absorción de energía durante el proceso de fisuración.

Así, para cada aplicación es necesario elegir fibras de un material y una forma de anclaje adecuado que, junto con una proporción correcta y considerando la distribución y orientación de las fibras de lugar a un hormigón con las propiedades buscadas. Por ejemplo, el uso habitual de fibras de polipropileno de bajo módulo de elasticidad controla la fisuración endógena, causada por la retracción, en las primeras horas de vida del hormigón. En ese momento los módulos de elasticidad de las fibras y la matriz son parecidos y son las fibras las que recogen las tensiones. Este concepto tiene su importancia porque ha sido uno de los usos más importantes de las fibras sintéticas hasta la fecha, especialmente para hormigón proyectado o soleras. La forma de trabajo de una fibra se muestra en la Figura 1.

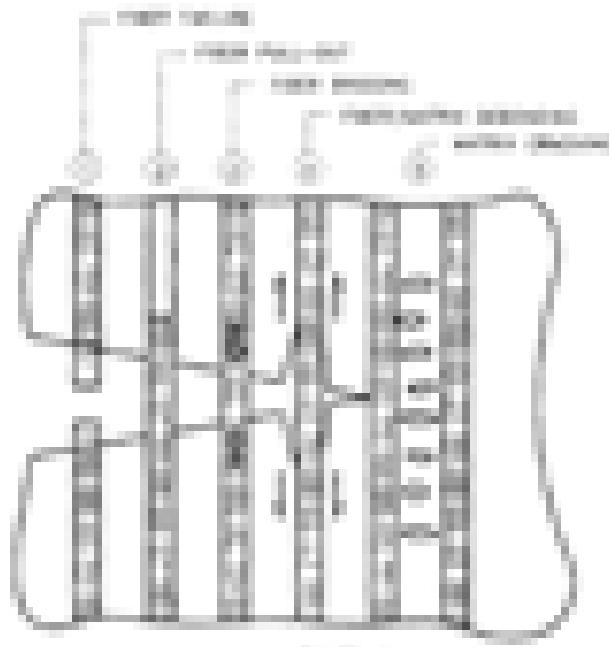


Figura 1. Mecanismos de absorción de energía en un material compuesto con fibras (Zollo, 1997)

Si la fibra trabaja de forma óptima, la apertura de fisura estará controlada por las fibras perfectamente ancladas a ambos lados de la fisura produciéndose un efecto de *puenteo* de la fisura como se puede ver en el caso 3 de la Figura 1. En caso de que la fisura crezca y las deformaciones se incrementen en las fibras, es posible que se produzca la rotura de la fibra (caso 1 de la Figura 1). En los casos intermedios, la superficie de contacto o la forma de terminación de la fisura pueden dar lugar a otros tipos de fallo. Si la resistencia de la fibra se moviliza mediante tensiones tangenciales por adherencia, es posible que la fibra provoque la fisuración de la matriz al deformarse o que se produzca un deslizamiento por falta de adherencia como se puede ver en el caso 4 de la Figura 1. Además, si la fibra no está perfectamente anclada por no tener suficiente superficie de contacto en uno de los lados de la fisura, es posible que deslice, por lo que en casos de fibras rectas un parámetro fundamental podría ser la longitud mínima de anclaje. Esto se puede observar en el caso 2 de la Figura 1. En caso de que las fibras estén terminadas con forma de patilla (habitual en las fibras metálicas) es común que el anclaje falle bruscamente en cada fibra sin permitir así el fallo de la fibra conformada que al tener la superficie lisa desliza sin oposición una vez el anclaje rompe en su extremo.

Una posibilidad para evaluar la energía absorbida en cada uno de los mecanismos mencionados, es realizar ensayos de arrancamiento de fibras. No existe una norma que establezca como realizar el ensayo de arrancamiento. Sin embargo, suelen ser útiles para comparar el comportamiento del sistema fibra-matriz entre varios tipos de fibras y matrices. En la Figura 2 puede verse un esquema de los diferentes mecanismos que aparecen durante el arrancamiento de la fibra y la configuración de un ensayo de arrancamiento, normalmente denominados por el

anglicismo *pull-out*. Entre las interacciones fibra matriz, cabe destacar la adhesión química de la fibra a la matriz y la tensión superficial de cortante que es capaz de resistir la intercara entre la fibra y la matriz. En las fibras metálicas suelen disponerse formas como patillas en los extremos de las fibras para aportar un anclaje mecánico. En el caso de fibras poliméricas, este anclaje suele ser obtenido dotando a las fibras de rugosidad superficial.



Figura 2. Mecanismos de arrancamiento de una fibra (Alberti, 2015; Alberti, et al., 2016)

Otro parámetro fundamental que influye en el arrancamiento es la orientación de la fibra con respecto del plano de la fisura o, en el caso del ensayo, de la superficie de hormigón de la probeta. Además, teniendo en cuenta que será el número de fibras que estén actuando en dicho plano el que gobierne los procesos residuales post-fisuración, conocer el posicionamiento y orientación de las fibras es de vital importancia. Normalmente se estima usando el denominado factor de orientación, que puede obtenerse mediante las expresión (1). Con este parámetro se han podido establecer modelos analíticos que permiten obtener perfiles de posicionamiento de fibras. Esto tiene especial importancia cuando se utilizan hormigones autocompactantes o se vierte el hormigón en-moldes con formas que pueden influenciar de forma notable el posicionamiento de las fibras. La Figura 3 muestra un esquema de cómo el flujo del hormigón autocompactante y el efecto pared pueden influir en el posicionamiento de las fibras.

$$\theta = \frac{n}{th} = n \frac{A_f}{V_f A} \quad (1)$$



Figura 3. Influencia del efecto pared y el flujo del hormigón autocompactante en el posicionamiento de las fibras (Alberti, et al., 2018)

En los capítulos siguientes se presenta el comportamiento general de las fibras más representativas en el mercado actual de la construcción.

## 2. Hormigón reforzado con fibras de acero

### 2.1 Las fibras de acero como refuerzo del hormigón

Las fibras de acero están contempladas en el Anejo 14 de la EHE-08 y recogidas en la norma UNE-EN 14889-1 de 2008. En ella, se definen las fibras de acero como “*elementos rectos y deformados de alambres de acero estirado en frío, recortes de fibras de acero rectas o deformadas, fibras extraídas fundidas, fibras estiradas en frío y fibras molidas de bloques de acero que son adecuados para su mezcla homogénea con hormigón mortero*”.

La propia definición de la norma da una idea de que existe una gran variedad de fibras metálicas. Como se ha comentado previamente, esto es lógico debido a que las fibras de acero han sido las más utilizadas en el refuerzo estructural del hormigón. Dentro de ellas, las hay fabricadas con acero de bajo, medio y alto contenido de carbono, inoxidables, galvanizadas, etc. Estas fibras aportan mejoras notables a las propiedades mecánicas del hormigón frente a todo tipo de solicitudes con incrementos importantes de la tenacidad, ductilidad, resistencia a flexión, tracción, cortante, impacto, fatiga, etc. Por ello, tanto la normativa actual como la mayoría de los textos sobre refuerzo estructural con fibras, suelen estar basados en este tipo de fibras. Las propiedades más habituales de las fibras de acero son las descritas en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades típicas de las fibras de acero.

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	7,85
Longitud (mm)	13 - 80
Diámetro equivalente (mm)	0,50 – 1,00
Esbeltz ( $\lambda$ )	45-80
R. a tracción (MPa)	500-2000
Módulo de elasticidad (GPa)	>200
Alargamiento de rotura (%)	15 - 25
Dosificación (kg/m <sup>3</sup> )	25-70
Punto de fusión de la fibra	>800°C

Como refuerzo estructural es habitual utilizar fibras de acero estirado en frío, con extremos conformados en patillas y encoladas en peines que se separan durante el amasado. Las dimensiones más habituales son entre 35 y 70mm y con dosificaciones de entre 20 y 60kg/m<sup>3</sup>.

El almacenamiento de las fibras se debe realizar de forma que no se deterioren o contaminen y, especialmente, se deben evitar contactos con la humedad que puedan causar corrosión en las fibras.

Para la denominación de estas fibras es habitual que se indique el tipo de acero y se suele incluir su esbeltez que se define como la relación entre su longitud y su diámetro. Los rangos habituales de esbeltez son entre 45 y 80.

Cuando se van a utilizar las fibras en hormigón proyectado, las longitudes suelen estar en el orden de 30mm, no recomendándose superar los 40mm. La aplicación más habitual de las fibras con longitudes mayores suele ser para pavimentos. El aspecto de una fibra de acero con extremos conformados en patillas, de acero normal bajo en carbono, 35mm de longitud, 0,55mm de diámetro y 65 de esbeltez puede verse en la Figura 4.

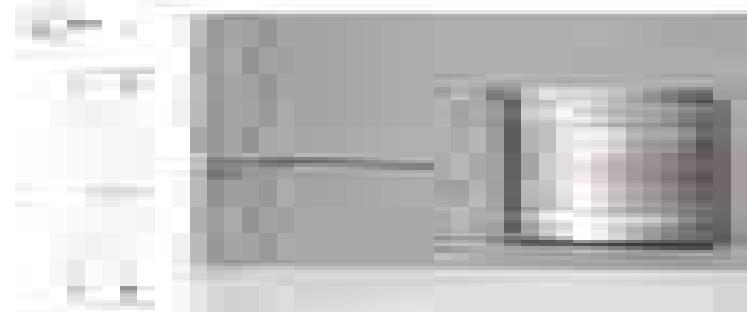


Figura 4. Fibras de acero con extremos conformados en patillas (Dramix RC-65/35-BN).

Con el fin de mejorar el mecanismo de refuerzo fibra – matriz cementicia, se han probado diversas formas pudiendo tener las fibras extremos conformados, ondulaciones, corrugas, aplastamientos, ganchos, etc. Este anclaje entre las fibras y el hormigón es determinante para las propiedades del hormigón reforzado con fibras de acero (HRFA). En la Figura 5 se presentan algunas de las formas en que se suministran las fibras de acero.

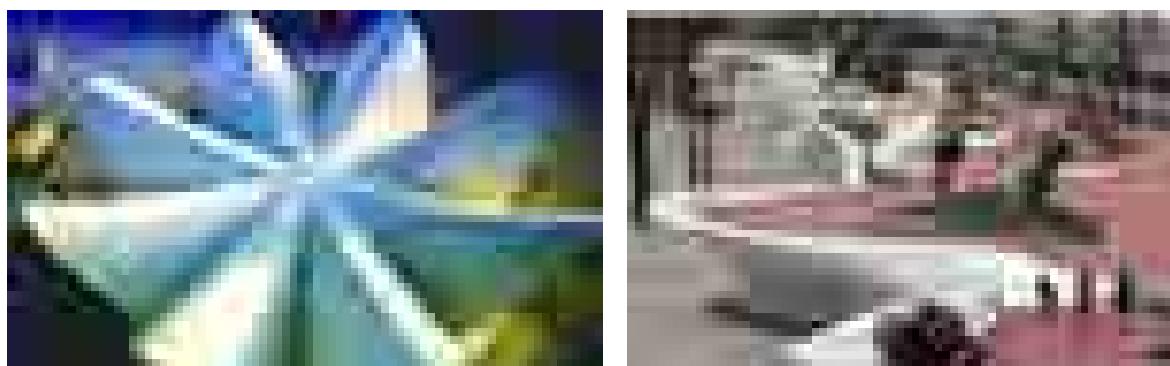


Figura 5. Tipología de fibras de acero.

## 2.2 Aplicaciones

En lo relativo a aplicaciones con HRFA, existe una experiencia de más de 30 años. El consumo de fibras de acero en España en el año 2007 se distribuyó aproximadamente al 50% entre túneles y minería (hormigón proyectado y dovelas) y pavimentos (industriales, puertos, aeropuertos, carreteras).

En la Figura 6 se muestran algunas aplicaciones representativas de HRFA.



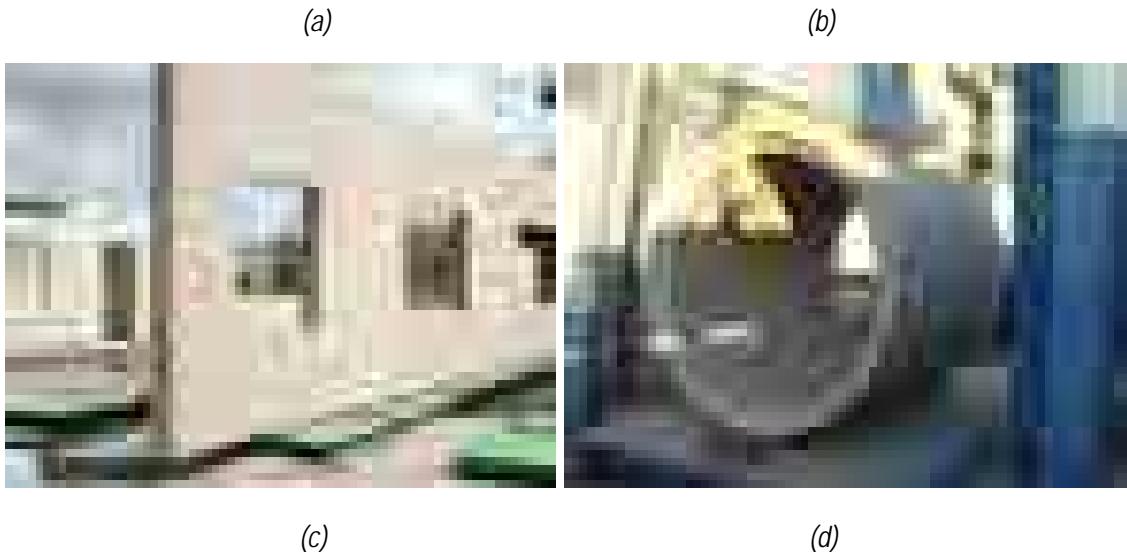


Figura 6. Aplicaciones de HRFA: (a) Cubierta en el Parque Oceanográfico de Valencia; (b) Muro del paseo marítimo de Benidorm, (c) Viviendas prefabricadas con hormigón con fibras de acero en Bélgica; (d) Tubo de saneamiento.

## 2.3 Dosificación

La adición de fibras no condiciona la naturaleza de los componentes del hormigón, aunque se debe tener en cuenta que afectan a la consistencia del hormigón. Es recomendable que los hormigones en los que se realice la adición de fibras tengan asientos superiores a 9cm en el cono de Abrams. Para el diseño del hormigón puede utilizarse cualquiera de los métodos de dosificación habituales: Bolomey, De la Peña, ACI 211, Faury, etc.

La fabricación de hormigones autocompactantes reforzados con fibras de acero, a pesar de que afectan a la docilidad, es posible y mejora en general sus propiedades en estado endurecido. Se recomienda, de forma general, que el tamaño del árido no supere 2/3 de la longitud de la fibra.

## 2.4 Propiedades mecánicas

El aumento de la fracción volumétrica o la geometría de las fibras mejoran la resistencia a compresión además de generar un incremento de la resistencia a la primera fisura en flexión y de la tenacidad de fractura. En todo caso, los incrementos de resistencia a compresión son modestos y existiendo un umbral de dosificación a partir del que se reduce dicha resistencia comparado con el mismo hormigón sin fibras. Esto probablemente ocurre debido a problemas de compactación y de trabajabilidad generados al incrementar la cantidad de fibras.

Las fibras incrementan la resistencia a tracción del compuesto debido a la acción de las fibras en el plano de la fisura. Un incremento de la dosificación de fibras mejora la resistencia a tracción indirecta y también su comportamiento post-fisuración.

Respecto a la influencia de las fibras en el módulo de elasticidad del hormigón ( $E_c$ ) se puede indicar que en muchas investigaciones se obtienen valores inferiores de módulo de elasticidad a pesar de que las fibras de acero tienen mayor módulo de elasticidad que la matriz. Sin embargo en términos generales el módulo de elasticidad del hormigón con fibras aumenta con la esbeltez de las fibras y la fracción volumétrica hasta que alcanza un valor máximo a partir del que comienza a disminuir. Sin embargo, para estimar un valor del módulo de elasticidad del compuesto, se puede emplear la relación que se obtiene directamente de la teoría de mezclas:

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Considerando  $E_f$  el módulo de elasticidad de las fibras y  $E_m$  el módulo de elasticidad de la matriz y  $V_f$  la fracción volumétrica de fibras.

El modelo de fisuración por cortante del HRFA es similar al del hormigón armado. Sin embargo las fibras incrementan la resistencia a cortante y mejoran el comportamiento de la armadura longitudinal.

En cuanto al punzonamiento, la aportación de fibras no solamente permite obtener mejoras en la resistencia, sino que modifica apreciablemente las superficies de rotura y evita el fallo frágil del hormigón armado.

## 2.5 Aportación de las fibras al cálculo estructural con Uso estructural del HRFA

Como ya se ha comentado previamente, el refuerzo con fibras de acero ha sido el que mayor expansión ha tenido dentro del campo de las fibras. Esto ha sido posible debido a la aparición de códigos y normativas como el Anejo 14 de la EHE-08, en los que se han establecido criterios y recomendaciones para tener en cuenta la aportación de las fibras en el cálculo.

La Instrucción EHE-08 establece valores para caracterizar el comportamiento del HRFA en función de los resultados obtenidos en el ensayo de flexión en tres puntos establecido en la norma UNE-EN 14651. Este se describirá con más precisión en el caso de las fibras sintéticas estructurales en el apartado 3.5. Los resultados de este ensayo proporcionan valores que permiten tener en cuenta la contribución de las fibras en Estados Límites de Servicio (ELS) y en Estados Límites Últimos (ELU). Los resultados de las curvas de fractura típicos son similares a los que se representan en las normas y que están basados en resultados reales. A continuación, en la Figura 7, se han representado las curvas obtenida en un ensayo de resistencia a tracción por flexión con diferentes dosificaciones de fibras. En ellas se puede ver el comportamiento post-fisuración de un HRFA con fibras de acero con extremos conformados en patillas. Cuando el anclaje mecánico falla, se produce el arrancamiento de las fibras. Esto es visible observando los escalones de descarga que se producen en las curvas.

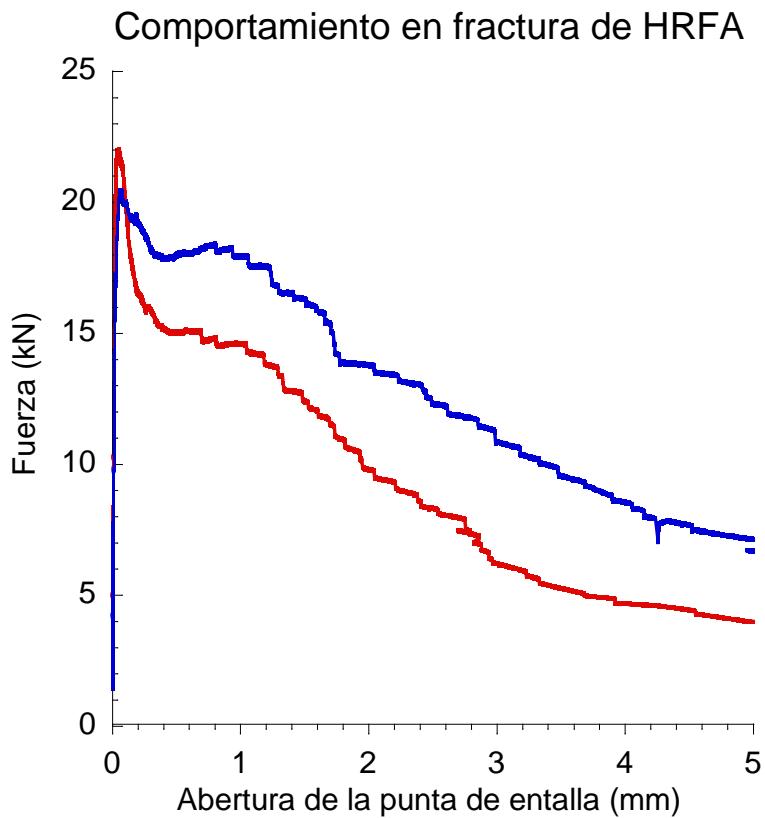


Figura 7. Curvas Fuerza- abertura de la punta de la entalla de HRFA

## 2.6 Otras propiedades

La aportación de fibras de acero ayuda a controlar la fisuración y mejora las propiedades mecánicas, la ductilidad y la energía de fractura. Su principal defecto, además del coste y el peso, es que el acero tiene tendencia natural a la corrosión. La despasivación del acero de refuerzo convencional evidentemente compromete la seguridad estructural en elementos de hormigón armado. Sin embargo, la evaluación de estos efectos sobre las fibras no está clara, aunque es obvio que, como las fibras están uniformemente distribuidas en su masa, algunas no tendrán los recubrimientos prescritos en las normas y por tanto pueden corroerse debido a los efectos agresivos del entorno.

Desde el punto de vista de un hormigón armado, de forma general, las fibras de acero sí pueden mejorar la durabilidad del material, reduciendo las picaduras de las barras y mejorando la resistencia frente a la exposición de cloruros debido a la menor abertura de las fisuras.

La trabajabilidad del hormigón se ve afectada de forma significativa con la adición de fibras de acero. Sin embargo, la rigidez de algunas fibras de acero también las hace especialmente adecuadas para combinar su uso con hormigón autocompactante. El flujo del hormigón tiende a alinear las fibras orientándolas perpendicularmente a la fisura, obteniendo por tanto mejores resultados en fractura.

En general, las fibras mejoran significativamente la respuesta de un hormigón frente a la abrasión, absorción de energía en flexión, impacto, etc. También aprovechan su capacidad mecánica para controlar la fisuración provocada por las acciones térmicas a corto y largo plazo. Sin embargo, sus efectos son muy pequeños para controlar la fisuración por retracción, frente a hielo-deshielo o fuego. Además, se debe controlar adecuadamente el almacenamiento, el manejo de las fibras y el acabado para evitar que se produzcan daños producidos por las fibras sobresalientes.



### 3. Hormigón reforzado con fibras macro-sintéticas estructurales

#### 3.1 Fibras macro-sintéticas estructurales

Se denominan fibras macro-sintéticas estructurales, aquellas fibras poliméricas con un diámetro igual o superior a 0,30mm y cuya contribución como refuerzo del hormigón puede ser tenida en cuenta si se cumplen determinados requisitos. Están compuestas por material polimérico basado en poliolefina (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado.

Las requisitos generales de las fibras poliméricas, bien sean para uso estructural o no estructural, están recogidos en la norma UNE-EN 14889-2 de 2008. También se encuentran recogidas algunas consideraciones generales en la actual Instrucción de hormigón estructural EHE-08. En dichas normas se definen algunos de los parámetros que sirven para caracterizar cada tipología fibra y que el fabricante en cada caso deberá aportar. Las definiciones más importantes que se deben tener en cuenta en la elección de las fibras, definidas en la norma UNE-EN 14889-2, son las siguientes:

- **Diámetro equivalente ( $d_e$ ):** diámetro de un círculo con un área igual al área media de la sección transversal de la fibra. Para fibras circulares, el diámetro equivalente es igual al diámetro de la fibra. Si la sección de la fibra es rectangular,  $w$  es el ancho de la fibra y  $t$  su espesor, se podría obtener mediante la siguiente relación:

$$d_e = \sqrt{\frac{4 \cdot w \cdot t}{\pi}}$$

Con el valor del diámetro equivalente, la sección transversal de una fibra ( $A_f$ ) se podría calcular como:

$$A_f = \frac{\pi \cdot d_e^2}{4}$$

- **Esbeltz ( $\lambda$ ):** relación entre la longitud y el diámetro equivalente de la fibra.
- **Forma de la fibra:** configuración exterior específica de la fibra, tanto en la dirección longitudinal como en la forma de la sección transversal y también los posibles recubrimientos superficiales y/o el agrupamiento de las fibras.
- **Resistencia a tracción de la fibra ( $R_m$ ):** tensión máxima que la fibra puede resistir.
- **Alargamiento de la fibra:** relación de la variación de longitud y la longitud inicial expresada en porcentaje.
- **Temperatura de fusión de la fibra:** temperatura a la cual el polímero se vuelve líquido.
- **Fracción volumétrica ( $V_f$ ):** contenido porcentual de fibras en volumen introducidas en la masa de hormigón. Habitualmente se presenta en % y se puede obtener mediante la relación:

$$V_f = \frac{W_f}{\rho \cdot V} * 100$$

Siendo  $\rho$  la densidad,  $W_f$  el peso de las fibras y  $V$  el volumen de referencia.

Las fibras de acero se suelen definir con la esbeltez mientras que las macro fibras sintéticas se suelen definir por su longitud y su diámetro equivalente. En el Anejo 14 de la EHE-08, se considera el uso de hormigón reforzado con fibras hasta una fracción volumétrica del 1,5%.

### 3.2 Aplicaciones

Las fibras macro-sintéticas estructurales han estado en pleno desarrollo en los últimos años. Aunque probablemente en los próximos años su uso pueda verse de forma habitual en soluciones mixtas o en combinación con distintas tipologías de fibras a día de hoy, las aplicaciones más habituales son:

- En usos estructurales, es habitual que se utilicen en hormigones proyectados, empleados en túneles y minería, así como en revestimientos debido al menor desgaste que producen en los equipos.
- En forjados u otros elementos estructurales para eliminar mallazos de reparto.
- En soleras y pavimentos industriales.
- En piezas prefabricados de tipo panel de cerramiento, o en piezas arquitectónicas de formas complejas como bancos, escaleras, etc.
- En elementos de pequeño espesor como losas prefabricadas o en cimentaciones de canalizaciones con sustitución, incluso total, del mallazo de acero convencional.
- En obras de rehabilitación con requerimientos de espesores muy estrictos y aportación estructural en las que ya se han obtenido buenos resultados.
- En estructuras de hormigón sometidas a ambientes agresivos. Bajo condiciones ambientales extremas también han sido probadas en túneles, zonas portuarias, etc. Sin embargo, los usos más antiguos de estas fibras tienen apenas 25 años de vida, por lo que frente a la durabilidad de las obras de unos 100 años de vida útil, el conocimiento es todavía modesto.

### 3.3 Características de las fibras

Se pueden presentar en diversas formas, siempre apropiadas para ser añadidas de forma homogénea al hormigón o mortero. En cuanto a su longitud, existen fibras desde 20mm aunque las más habituales con uso estructural son de 48mm de longitud hasta, en algunos casos, 60mm.

Alguna de las propiedades típicas que definen a esta tipología de fibras, que el fabricante deberá declarar en cada caso, se muestran en la Tabla 3. En la Figura 8 se puede ver el aspecto típico de este tipo de fibras. A la izquierda, con rugosidad superficial; a la derecha macro fibras poliméricas fibriladas.

Tabla 3. Propiedades típicas de las fibras poliméricas estructurales

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,85 - 0,95
Longitud (mm)	20 - 60
Diámetro equivalente (mm)	0,5 – 1,0
R. a tracción (MPa)	200 - 575
Módulo de elasticidad (GPa)	2,5 -20
Alargamiento de rotura (%)	15 - 25
Dosificación (kg/m <sup>3</sup> )	3-12
Punto de fusión de la fibra	150°C



Figura 8. Fibras de poliolefina: fibras con rugosidad superficial (izquierda) y fibras de poliolefina fibriladas (derecha).

### 3.4 Propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras macro-sintéticas estructurales

El aumento en la resistencia a compresión es discutible en función del tipo de fibra y la fracción volumétrica. Sin embargo, el fallo en compresión es menos brusco y permite mayores deformaciones sin que se produzca el colapso. Además, solo se producen pequeñas pérdidas de masa durante la rotura incluso con pequeñas fracciones volumétricas. Esta forma de rotura puede proporcionar ventajas en fachadas, en construcciones militares o en túneles donde se quieren evitar desprendimientos. La mejora de algunas propiedades mecánicas está todavía en discusión ya que, según se incrementa la fracción volumétrica, se puede ver afectada la trabajabilidad o la compactación y podrían dar lugar a otros perjuicios. En el caso de la resistencia a compresión, estos incrementos son pequeños y con el aumento de la fracción volumétrica existe un umbral en el que se obtienen valores inferiores a los que se obtienen en un hormigón sin fibras, probablemente por problemas de compactación y de trabajabilidad.

La aportación de fibras incrementa la resistencia a tracción debido a la acción de las fibras a través de las fisuras. Un incremento de la dosificación de fibras mejora la resistencia a tracción indirecta y también su comportamiento post-fisuración.

Las variaciones en el módulo de elasticidad son muy pequeñas. Se obtienen reducciones apreciables con dosificaciones altas de fibras, a partir de unos  $10\text{kg/m}^3$ .

En cuanto al cortante, las fibras aportan también tenacidad o y resistencia frente a estas solicitudes. Se ha observado en vigas únicamente reforzadas con barras longitudinales, es decir, sin armadura de cortante, el típico fallo en diagonal de cortante por agotamiento de la biela de compresión.

### 3.5 El refuerzo estructural con fibras macro-sintéticas estructurales

Las fibras macro-sintéticas estructurales, son fibras poliméricas con propiedades mecánicas mejoradas y con tratamientos superficiales que mejoran los mecanismos del material compuesto sometido a tracción. Estas dos características permiten tener resultados similares a los obtenidos con fibras de acero, siendo químicamente estables, lo que abre la posibilidad de la sustitución parcial o total de las barras de acero convencional. Además, la cantidad de fibras requerida es menor que la de fibras de acero lo que disminuye a su vez a reducir el coste económico.

La aptitud estructural del hormigón reforzado con fibras se realiza mediante ensayos de resistencia a la tracción por flexión según la norma UNE-EN 14651. El ensayo descrito en dicha norma es un ensayo de flexión en tres puntos con entalla. A pesar de estar este ensayo destinado a determinar la resistencia residual a tracción por flexión de hormigones con fibras metálicas, se utiliza también para fibras poliméricas estructurales ya que los parámetros que la EHE-08 utiliza para evaluar la aptitud estructural de las fibras se basan en él. Concretamente, la Instrucción EHE-08 en el Anejo 14 dice:

*“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”.*

La resistencia residual a tracción por flexión, se define como la tensión teórica en el extremo de la entalla que actúa sobre el punto medio de una sección sin fisuras, con una distribución de fuerza lineal de un prisma sometido a una carga  $F_j$  para cada correspondiente valor de desplazamiento relativo de los extremos de la fisura. Si observamos el esquema del ensayo normalizado en la norma UNE-EN 14651 que se muestra en la Figura 9, el valor de fuerza obtenido para una apertura determinada se puede pasar a resistencia  $f_{ct,j}$  mediante la ecuación:

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

Donde  $L$  es la distancia entre apoyos de 500mm,  $b$  es el ancho de la probeta (150mm) y  $h_{sp}$  es la longitud del ligamento en la sección de la entalla.

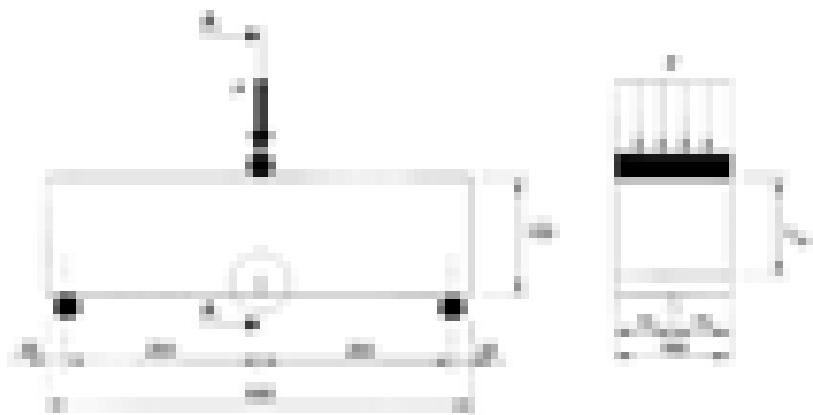


Figura 9. Configuración del ensayo UNE-EN 14651.

Esta ecuación es la que se obtendría con la formulación de Resistencia de Materiales considerando la sección constante en cada abertura de los extremos de la entalla. Siendo la fuerza actuante en cada caso  $F_j$ , el momento flector resultante en la sección sería:

$$M = \frac{F_j \cdot L}{4}$$

Y por lo tanto la tracción en la punta de la entalla:

$$f_{ct,j} = \frac{M \cdot y}{I} = \frac{\frac{F_j \cdot L}{4} \left( \frac{h_{sp}}{2} \right)}{\frac{1}{12} (b \cdot h_{sp})^3} = \frac{3}{2} \frac{F_j \cdot L}{b \cdot h_{sp}^2}$$

Hasta cierto límite de fracción volumétrica, cuanto mayor número de fibras mejores resultados se obtienen en el ensayo UNE-EN 14651. La influencia de la tipología de las fibras y sus propiedades es también notable, por lo que la elección de la fibra debe hacerse cuidadosamente y contrastarse posteriormente con ensayos.

En cualquier caso el punto débil de estas fibras aparece en pequeñas deformaciones ya que tras alcanzar la carga máxima el descenso que se produce en la descarga a través de una rama de ablandamiento es mayor que para las fibras de acero con patillas que son la referencia tradicional. Sin embargo, este tipo de fibras ha demostrado tener un magnífico comportamiento para deformaciones muy importantes. En torno a los 5mm de flecha del ensayo se alcanza un valor máximo post-fisuración generalmente superior al obtenido para pequeñas deformaciones. Este comportamiento se puede entender mejor observando la Figura 10 en la que se han representado ensayos de un hormigón con diferentes cuantías de fibras de poliolefina de 60mm de longitud.

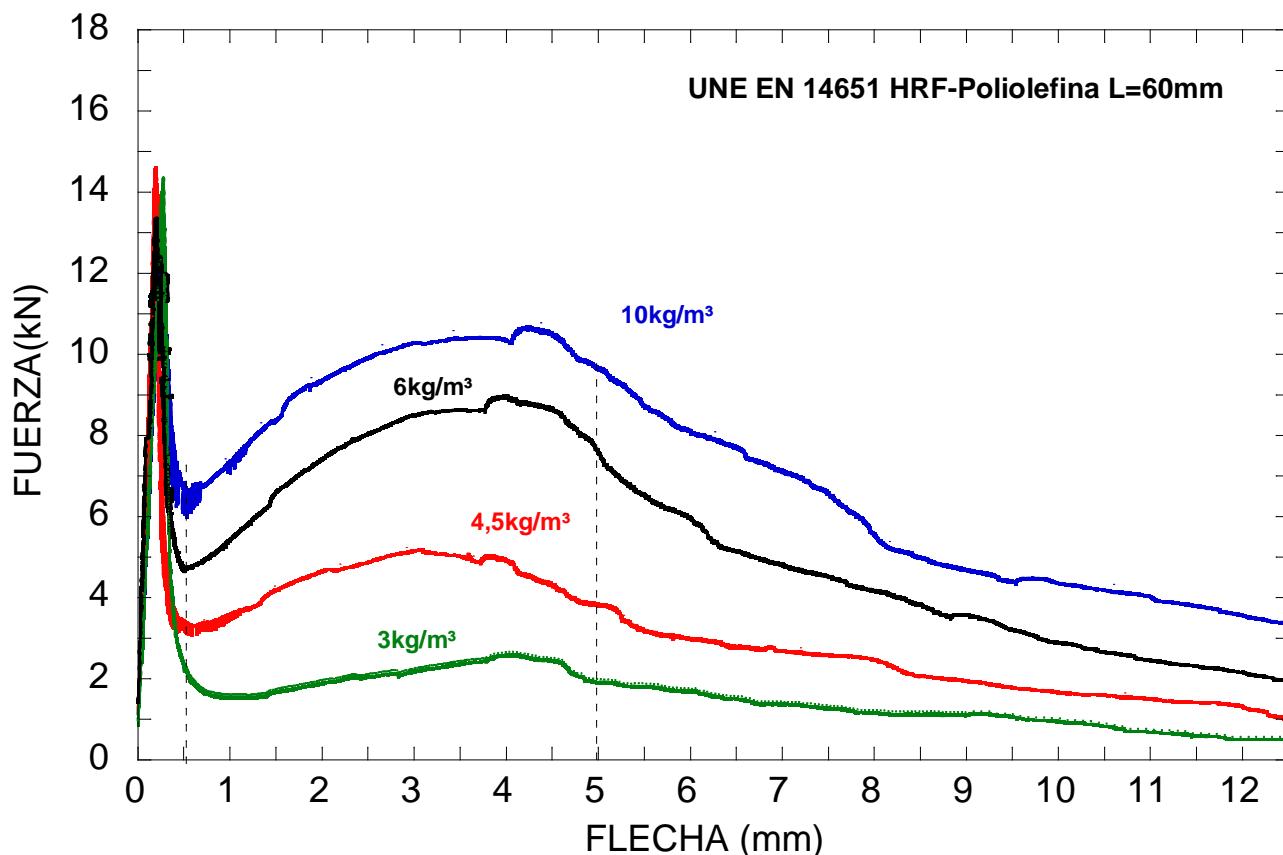


Figura 10. Curvas Fuerza – flecha de hormigones reforzados con distintas proporciones de fibras de poliolefina.

### 3.6 Otras propiedades

El desarrollo del hormigón como material de construcción ha hecho que los posibles requerimientos como material estructural sean muy variados. Algunos de los requerimientos actuales están fuertemente ligados con la durabilidad y la sostenibilidad, pero también ha cobrado especial importancia el comportamiento de los materiales

de construcción frente a sismo, impacto, fatiga, etc. Una de las principales ventajas en cuanto a la durabilidad de las fibras poliméricas es su estabilidad química y la eliminación de problemas de corrosión que pueden tener las fibras de acero. La durabilidad frente a ambientes con cloruros mejora significativamente al usar fibras poliméricas.

La durabilidad del hormigón está fuertemente relacionada con la permeabilidad, que tiende a aumentar ligeramente en el hormigón reforzado con fibras poliméricas estructurales. En cuanto a la resistencia frente a hielo-deshielo, los hormigones reforzados con fibras poliméricas mejoran la respuesta de un hormigón convencional.

Por otro lado, la aportación de fibras puede afectar al estado fresco. Esta cuestión es aún de mayor relevancia cuando se combina el hormigón reforzado con fibras con el hormigón autocompactante. Esta combinación es habitual con el fin de aprovechar el flujo del hormigón para mejorar la orientación y distribución de las fibras. Las macro fibras sintéticas, de forma general, reducen la trabajabilidad del hormigón y esto debe ser tenido en cuenta. Sin embargo, esta reducción es significativamente menor que la que se produce con fibras de acero. Se podría estimar que la reducción del diámetro en un ensayo de escurrimiento con una fracción volumétrica de fibras de acero de longitud 35mm conformadas de 0,33% (25kg/m<sup>3</sup>) es equivalente a la obtenida para fibras de poliolefina de 60mm con un fracción volumétrica de 1,10% (10kg/m<sup>3</sup>).

En cuanto a la retracción plástica, las fibras macro-sintéticas estructurales mejoran ligeramente el comportamiento de un hormigón sin fibras. Sin embargo, aunque el material del que están fabricadas es muchas veces polipropileno, no se deben confundir con las micro fibras de polipropileno no estructurales y que suelen utilizarse para el control de la fisuración por retracción inicial. Para diferencias de temperatura importantes las fibras macro-sintéticas sí han mostrado reducir la fisuración.

Las fibras poliméricas en general mejoran su resistencia al frente al denominado *spalling* o estallido que se produce debido a las presiones internas cuando la estructura está sometida a fuego. Aunque las macro fibras también mejoran la respuesta del material en dicha situación, su aportación no es tan relevante como en el caso de las micro fibras de polipropileno.

Frente a situaciones de impacto o abrasión las fibras poliméricas mejoran modestamente la respuesta del material aunque la aportación no es tan significativa como en el hormigón reforzado con fibras de acero.

Otra interesante ventaja que pueden tener las fibras poliméricas es que reducen el desgaste de los equipos de bombeo y que, junto con la mejor trabajabilidad, pueden hacer muy adecuado su uso para hormigones proyectados.

La materia prima empleada tiene una densidad aproximadamente 8,5 veces inferior si se compara con las fibras de acero. Por lo tanto, el número de fibras por kg es considerablemente superior en el caso de las fibras sintéticas a un mismo diámetro y longitud. Consecuentemente, con un peso significativamente inferior se puede conseguir aportar el mismo número de fibras. Desde el punto de vista operativo y del manejo, esto ofrece importantes ventajas.

Además, el incremento de la seguridad también debe tenerse en cuenta ya que reducen el riesgo de daños durante el manejo. Por un lado, en los equipos el riesgo de pinchazos y cortes es casi nulo, lo que permite garantizar la continuidad en casos de bombeos y hormigones proyectados. Por otro lado, las fibras pueden sobresalir de la superficie de acabado, especialmente para mezclas muy pobres y, en dicho caso, las fibras poliméricas además de ofrecer un mejor acabado pueden evitar los riesgos que producen las fibras rígidas de acero cuando sobresalen de la superficie de un elemento en uso en una estructura.

También se debe tener en cuenta que las fibras metálicas pueden no estar aconsejadas para determinados usos donde haya corrientes eléctricas y la sustitución por fibras poliméricas puede ser planteada como una alternativa técnica y económica.

## 4. Hormigón reforzado con micro fibras de polipropileno

### 4.1 Introducción

Según la EHE-08, se consideran micro fibras poliméricas aquellas fabricadas con un material polimérico y con un diámetro inferior a 0,30mm. Dichas micro fibras se emplean habitualmente para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural. En otras aplicaciones muy conocidas, 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 el número de fibras presentes en 1 kg, y que depende de la longitud de fibra y muy especialmente de su diámetro.

Las micro fibras poliméricas suelen estar compuestas por polipropileno virgen y se clasifican en dos tipologías según su forma: mono-filamentosas y fibrilosas. Las propiedades más habituales de las micro fibras poliméricas se presentan en la Tabla 4 y su aspecto se presenta en la Figura 11.

Tabla 4. Propiedades de microfibras de polipropileno.

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	0,910
Longitud (mm)	12 - 20
Diámetro equivalente (mm)	0,02 – 0,023
R. a tracción (MPa)	500-600
Módulo de elasticidad (GPa)	1,9-2,1
Alargamiento de rotura (%)	15 - 25
Dosificación (kg/m <sup>3</sup> )	1 - 2
Punto de fusión de la fibra °C	150 - 500



Figura 11. Aspecto de fibras de microfibras de polipropileno.

Desde el punto de vista químico hay varios aspectos de las fibras de polipropileno que son de especial importancia. En primer lugar, las fibras de polipropileno tienen una gran estabilidad química no siendo atacadas por casi ningún componente químico. Además, en el caso de que un hormigón con este tipo de fibras esté expuesto a un agente agresivo el deterioro del hormigón se producirá mucho antes que el de la fibra. En segundo lugar las fibras de polipropileno son de un material hidrófobo por lo que no tienen tendencia a formar erizos. Por último, los enlaces que existen entre los filamentos de fibras son muy débiles lo que facilita la separación de las fibras y la correcta dispersión de las mismas en la matriz.

## 4.2 Aplicaciones

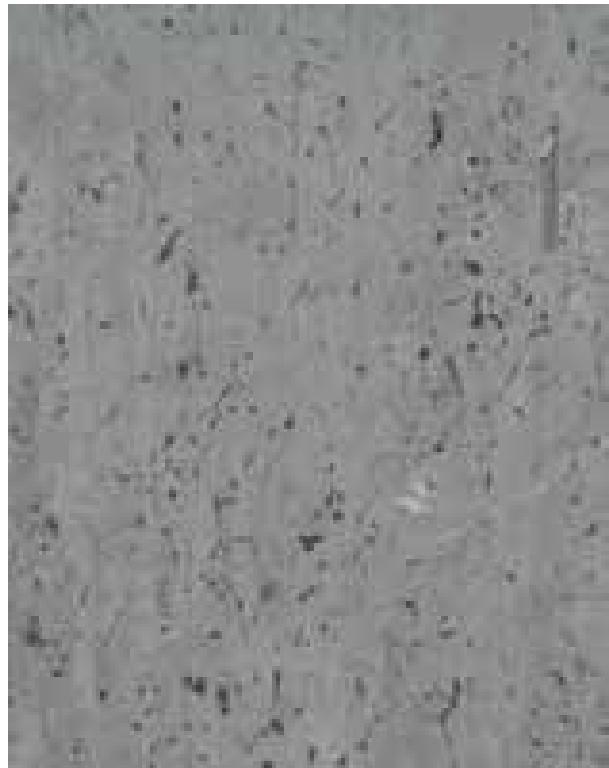
La principal aplicación de cualquier tipo de fibras es la reducción o eliminación de la presencia de fisuras en el hormigón. Esto es de vital importancia ya que las fisuras y grietas suponen caminos de entrada de agentes nocivos, bien para el propio hormigón o para las armaduras en caso de que el hormigón sea armado. Sin embargo la reducción de la anchura de las fisuras causada por la presencia de fibras proporciona una mejora de las condiciones de servicio y durabilidad de las estructuras.

Las fibras de polipropileno son capaces de unir ambos lados de las fisuras. Éstas pueden aparecer en el hormigón como consecuencia de los siguientes fenómenos: retracción plástica, daño causado por ciclos hielo-deshielo o daño causado por el fuego. Además de estos usos, es de gran importancia la ductilidad adicional que proporciona la presencia de fibras de polipropileno al hormigón sin armaduras.

La retracción plástica se produce debido a la evaporación de la humedad superficial del hormigón a una velocidad a la que aflora a la superficie. El uso de fibras de polipropileno para evitar la fisuración por retracción plástica es efectiva con proporciones de fibras del 0,1%. Las fibras de polipropileno son capaces de reducir la fisuración en un factor de 5-10 siendo este proporcional al contenido de fibra.

La mejora del comportamiento del hormigón con fibras de polipropileno frente al daño causado por los ciclos de hielo-deshielo se basa en una reducción de la cantidad de agua que entra en la masa de hormigón. Esto se consigue ya que las fibras interrumpen las redes capilares y se entrecruzan con la estructura porosa dificultando el flujo del agua.

La aplicación de las fibras de polipropileno para la mejora del comportamiento del hormigón frente al fuego se fundamenta en la baja temperatura de fusión de las fibras. Durante el calentamiento del hormigón el vapor formado al superar los 100°C puede causar la explosión del hormigón por el aumento de volumen que tiene lugar al pasar el agua líquida a vapor. Sin embargo, dado que el polipropileno funde a 160°C al alcanzarse dicha temperatura las fibras se funden creándose nuevos espacios en los que se puede alojar el vapor reduciendo la presión en el interior. Esta reducción de presión evita los bruscos estallidos que se producen en el hormigón sin fibras. En la Figura 12 se puede observar el resultado de un hormigón reforzado con fibras de poliolefina tras ser sometidos a ensayos de comportamiento frente al fuego.



*Spalling* debido a la presión de vapor de agua en ausencia de fibras adecuadas

Manchas de agua debidas al vapor que sale por los huecos dejados por la fibras

*Figura 12. Hormigón reforzado con fibras de polipropileno sometido a ensayos de comportamiento frente al fuego.*

#### 4.3 Dosificación

Las dosificaciones de hormigón con fibras de polipropileno son similares a las que normalmente se usan en hormigones convencionales. En el caso de usar cantidades cercanas a una fracción volumétrica de 0,50% de fibras puede ser necesario incorporar algún aditivo superfluidificante que reduzca la viscosidad del hormigón en estado fresco.

Es también importante resaltar que las fibras deben ser añadidas en último lugar durante el proceso de mezclado puesto que los áridos producen abrasión en las mismas pudiendo llegar a dañarlas.

#### 4.4 Propiedades mecánicas

La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del hormigón reforzado con fibras de polipropileno no difiere en gran medida respecto a la de un hormigón convencional. Sin embargo, se produce un cambio en la forma de fallo, las probetas dejan de tener un fallo explosivo y pasan a tener un agrrietamiento general sin gran pérdida de masa. La resistencia a tracción indirecta si refleja una mejora de alrededor del 70% cuando se añade un 0,4% de fibras.

Por otra parte, el mayor efecto de las fibras de polipropileno se produce bajo solicitudes de flexión. Si la cuantía de fibras alcanza una proporción indicada el comportamiento del hormigón en flexión pasa de ser frágil debido a la formación de una fisura a tener multifisuración convirtiéndose en un material pseudo-dúctil. En la Figura

13 se puede ver la mejora de comportamiento que supone la adición de fibras de polipropileno al hormigón con un porcentaje de 0,11 (M2), 0,32 (M3) y 0,54 (M4) de fibras en un ensayo de flexión en cuatro puntos.



Figura 13. Comportamiento de hormigón reforzado con fibras de polipropileno a flexión

En esta figura se ve que la carga máxima no está afectada por el contenido de fibras cuando se utilizan en proporciones bajas. Además, se aprecia que las fibras no son capaces de absorber la carga que soportaba la probeta en su rama elástica. Sin embargo según aumenta el contenido de fibras aumenta la ductilidad del hormigón y la caída de carga posterior a la carga máxima es más pequeña. Hay que destacar asimismo que en ningún caso estas fibras pueden ser consideradas como estructurales en el cálculo del elemento de hormigón.

## 5. Hormigón reforzado con fibra de vidrio

### 5.1 Introducción y materiales

El mortero de cemento reforzado con fibra de vidrio (conocido por sus siglas en inglés GRC) es un material compuesto que está formado por una matriz de mortero de cemento y fibras cortas de vidrio. Fue ideado alrededor de 1950 cuando se empezaron a concebir aplicaciones en las que las fibras de vidrio se introducían en el material en forma de mallas y no formando parte de las barras de armado del hormigón. Sin embargo, el GRC como se concibe hoy en día surge en los años 60 del siglo XX cuando apareció la necesidad de sustituir las fibras de amianto, debido a su componente cancerígeno, por otro tipo de fibras.

Los primeros tipos de GRC estaban formados por fibras de vidrio de tipo E y una matriz realizada con mortero de cemento Portland. Las fibras se introdujeron de diferentes formas y se comprobó en todas ellas la mejora de propiedades que producían en el mortero de cemento. Sin embargo, las propiedades del material a corto plazo, desaparecían con el paso del tiempo. Esto se achacó a la corrosión que sufrían las fibras de vidrio por parte de la matriz de cemento. Para ampliar los campos de aplicación del GRC se desarrollaron fibras de vidrio resistentes a los entornos alcalinos. Se varió el elemento base de la formulación química de las fibras de vidrio que pasaron de tener una base silícea a tener como elemento base el circonio. Estas fibras se llamaron fibras *alcali resistant* o AR.

Las propiedades mecánicas más representativas de las fibras de vidrio se pueden ver en la Tabla 5. Además, es importante señalar que las fibras de vidrio no son fibras monolíticas, sino que están formadas por un haz de unos 200 filamentos de vidrio de unos  $10-20\mu\text{m}$  de diámetro como se puede apreciar en la fotografía de la izquierda de la Figura 14.

Tabla 5. Propiedades orientativas de las fibras de vidrio

	fibras AR
Módulo de elasticidad a 25°C (GPa)	70
Resistencia a tracción una fibra (MPa)	3.600
Resistencia a tracción haz de fibras (MPa)	1750
Deformación de rotura	2%

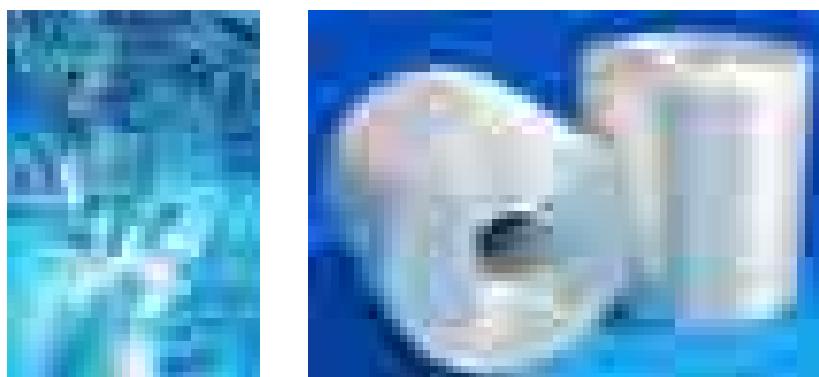


Figura 14. Fibras de vidrio sueltas (izquierda) y bobina de haces de fibra de vidrio (derecha).

La fracción volumétrica de fibras que se incluye en el GRC es pequeña, variando del 3.5% al 5% en función del método de fabricación del mismo. La longitud de las fibras empleadas se encuentra entre 25 y 40mm.

En la dosificación del mortero de cemento se utiliza cemento Portland que constituye cerca del 90% del cemento que se usa en la industria de la construcción en el mundo. Aunque en la fabricación de GRC este cemento es prácticamente el único utilizado, en estudios e investigaciones también se han empleado cementos aluminosos, supersulfatados, etc. La arena a emplear suele ser de origen silíceo. A estos dos componentes principales se suele añadir un plastificante que ayuda a que el mortero de cemento tenga la viscosidad adecuada. A estos materiales se les pueden añadir todo tipo de adiciones y pigmentos para lograr que los elementos constructivos tengan el aspecto deseado.

## 5.2 Dosificación

La fracción volumétrica de fibra de vidrio empleada depende del método de fabricación. En el caso de los métodos de fabricación en los que el GRC es proyectado se añade un 5% en fracción volumétrica de fibras de vidrio. Cuando se emplea el premezclado de las fibras y el mortero de cemento la fracción volumétrica de fibras es del 3,5%.

La dosificación del mortero de cemento que se emplea en el GRC a nivel industrial está sujeta a pocas variaciones. Las proporciones más usuales empleadas utilizan los mismos pesos de cemento y de arena. A estos dos componentes se añade el agua fijando normalmente una relación agua/cemento de 0,4. Esta relación está sujeta a modificaciones debidas a la necesidad de alcanzar una fluidez adecuada al proceso de fabricación elegido. Para no aumentar en exceso la cantidad de agua se suelen emplear aditivos superplastificantes idénticos a los empleados para la fabricación de hormigones.

Debido a los problemas de pérdida de propiedades del material con el paso del tiempo, en algunas ocasiones se han empleado adiciones, principalmente humo de sílice y metacaolín, buscando mantener a edades avanzadas las propiedades del material joven. Estas adiciones se han empleado frecuentemente en trabajos de investigación.

## 5.3 Fabricación

Hay tres métodos principales de fabricación del GRC en la actualidad: proyección conjunta del GRC, premezclado de GRC y premezclado de GRC y proyección posterior. Dentro de cada uno de ellos existen variaciones.

### 5.3.1 Método de proyección conjunta

La proyección conjunta del material se realiza usando una pistola que proyecta las fibras y el mortero por orificios diferentes sobre un molde en el cual se unen y mezclan los dos componentes. Por la parte superior de la pistola llega un cordón de fibras de vidrio que procede de una bobina y que se corta en el cabezal de la pistola a la longitud deseada. Por la parte inferior de la pistola llega una manguera por la que fluye el mortero de cemento. El mortero de cemento debe tener una consistencia fluida para hacer posible la proyección. Hay dos variantes: la proyección manual y la proyección automática

El proceso de proyección manual comienza con la aplicación de un desencofrante en el molde sobre el cual se va a realizar la proyección del material. Posteriormente se realiza una primera pasada con la pistola depositando el material mediante movimientos de vaivén. Cuando el molde tiene una fina capa de material sobre su superficie se pasa un rodillo helicoidal para que el mortero y las fibras se adapten a la forma del encofrado. Se continúa la proyección hasta alcanzar el espesor adecuado y se pasa una llana sobre la superficie libre para hacer que esta sea lo más uniforme posible. Este método tiene como gran inconveniente que requiere una gran cantidad de mano de obra. Sin embargo, los resultados, siempre que el operario tenga la experiencia necesaria, son de alta calidad. En la Figura 15 se puede ver un instante del proceso de proyección manual. Este método de fabricación es el de mayor difusión en España.



Figura 15. Proyección manual de GRC

La proyección automática se emplea casi exclusivamente para la fabricación de paneles rectangulares. En general, los elementos que se realizan son planos y con formas sencillas. Este método es menos versátil en las formas que se pueden conseguir que el método manual. El sistema automático tiene una de estas dos posibilidades, un cabezal de proyección móvil o bien de un sistema que mueve el molde. En cualquiera de estos dos sistemas, la velocidad a la que se realiza la proyección está controlada para lograr una correcta distribución del material. La cara libre de la pieza se enrasta con un sistema automático que pasa una llana, un rodillo o cualquier otra herramienta que iguale el espesor de la pieza en toda la superficie. La ventaja que presenta este método frente al manual es la mayor producción y el menor coste. El sistema de automatizado ha sido mejorado usando moldes que tengan una serie de pequeños agujeros que permitan la salida del exceso de agua. Este proceso reduce la proporción agua/cemento, y por tanto aumenta la densidad del material y mejora sus propiedades mecánicas. Otra variante de este método incluye la aplicación de una carga en la cara libre del material para lograr que la mezcla se acople con la mayor exactitud posible a los dibujos y motivos del molde.

### 5.3.2 Método de premezclado

Se denomina método de premezclado a aquel en el que se realiza la mezcla de todos los componentes del material (cemento, fibras de vidrio, agua, arena, plastificante y adiciones) antes de verterlo en el molde. El método consta de dos fases: la fabricación del mortero de cemento y la unión del mortero con las fibras de vidrio. Para evitar la formación de ovillos, se sumergen las fibras ya cortadas en aditivos que las lubrican facilitando su dispersión dentro de la matriz de mortero de cemento. Es importante reducir al mínimo el tiempo de mezclado del mortero de cemento y las fibras para evitar la segregación y pérdida de agua de la mezcla. Una vez mezclados todos los componentes, la pasta se vierte en moldes abiertos o parcialmente abiertos. Los moldes una vez llenos se someten a un proceso de vibrado externo para evitar la aparición de burbujas de aire y los espacios vacíos. Cuando hay que llenar moldes con huecos la mejor manera de introducir el GRC premezclado es inyectándolo. Sin embargo, la inyección de GRC daña las fibras y en ocasiones se introducen burbujas de aire en los moldes.

### 5.3.3 Método de premezclado y proyección

En los últimos años ha surgido un nuevo método de fabricación de GRC denominado *sprayed premix*. En este método las fibras de vidrio se añaden durante el proceso de mezclado del mortero de cemento y posteriormente se realiza la

proyección de los dos componentes ya mezclados, en el molde. Con este método se consiguen resultados similares a los que se obtienen con el proceso de proyección tradicional. Sin embargo tiene las siguientes ventajas: la calidad de los elementos fabricados depende menos de la habilidad del operario; el contenido de fibra se determina en peso siendo más preciso que el método tradicional; se elimina la posibilidad de que haya burbujas de aire y la maquinaria de proyección es mucho más sencilla.

## 5.4 Propiedades mecánicas

Las fibras de vidrio mejoran la ductilidad del mortero de cemento y su resistencia a tracción. El mortero de cemento confina las fibras dentro de una matriz cementícea que aporta resistencia a compresión. Así pues, la unión de ambos materiales proporciona un material que tiene una resistencia a tracción y ductilidad mayor que el mortero de cemento. Además también posee una resistencia a compresión alta ya que la que proporciona el mortero de cemento no se ve reducida por la inclusión de las fibras de vidrio. Las principales propiedades mecánicas del GRC se pueden ver en la Tabla 6.

Tabla 6. Propiedades mecánicas GRC.

	<b>GRC joven</b>	<b>GRC envejecido</b>
<b>Densidad</b>	1900-2250 Kg/m <sup>3</sup>	1900-2250 Kg/m <sup>3</sup>
<b>Módulo de Elasticidad</b>	10 – 20 GPa	7 – 24 GPa
<b>Resistencia Compresión</b>	48 – 83 MPa	70 – 83 MPa
<b>Resistencia Flexión</b>		
A la primera fisura	6 – 10 MPa	7 – 11 MPa
Resistencia última	17 – 25 MPa	9 – 14 MPa
<b>Resistencia tracción</b>		
A la primera fisura	4,8 – 7,0 MPa	4,8 – 8,0 MPa
Resistencia última	7,0 – 11,0 MPa	5,0 – 8,0 MPa
<b>Deformación de rotura</b>	0,60 – 1,20 %	0,03 – 0,50 %

En la Tabla 6 hay que destacar el cambio de propiedades que se produce con el paso del tiempo. En la Figura 16 se puede ver el cambio de propiedades del GRC con el paso del tiempo donde se aprecia una pérdida de ductilidad y de capacidad de carga.

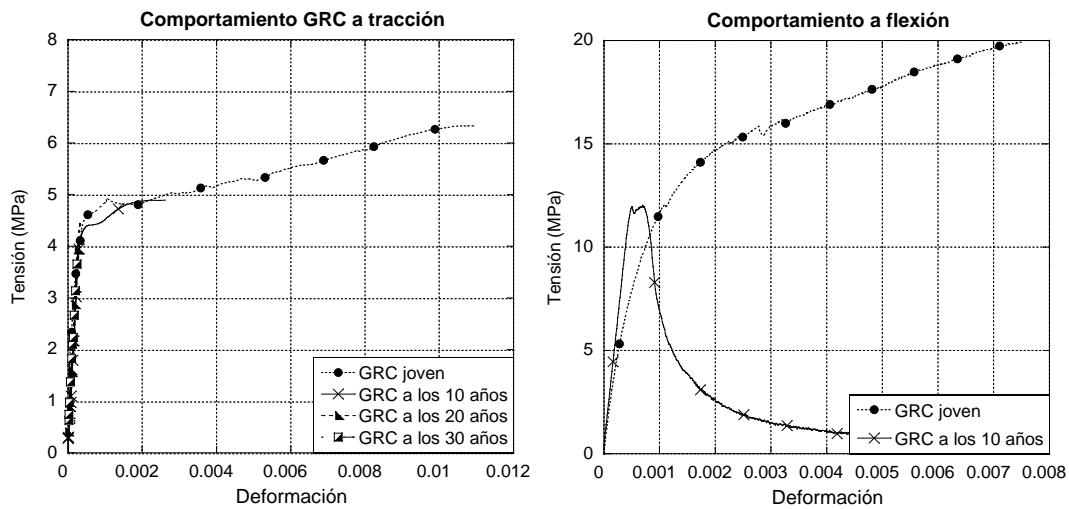


Figura 16. Variación del comportamiento del GRC con el paso del tiempo

Este cambio se justifica por dos fenómenos: la corrosión de las fibras de vidrio en la matriz de cemento y la formación de compuestos resultantes de la hidratación del cemento entre los filamentos de los haces. A día de hoy no se conoce la importancia de cada uno de ellos por separado puesto que tienen lugar simultáneamente. Sin embargo, parece que tiene mayor relevancia la pérdida de sección de los filamentos debido a la corrosión química que tiene lugar en el entorno alcalino de la matriz de mortero de cemento.

## 5.5 Aplicaciones

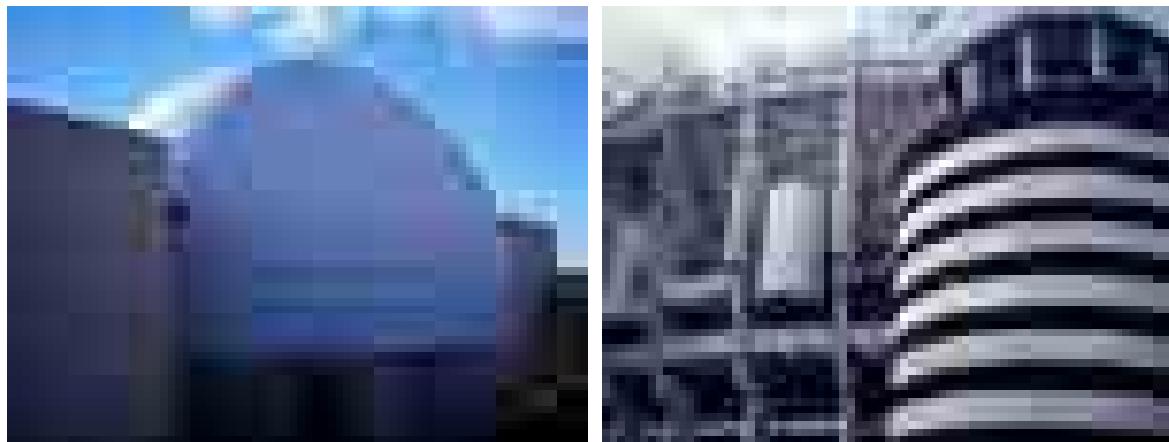
El GRC es un material compuesto cementíceo que se caracteriza por sus buenas propiedades mecánicas y que no necesita armaduras. Tiene una versatilidad de diseño enorme y con él se pueden lograr formas muy diversas con espesores de alrededor de 10 mm. El GRC se utiliza generalmente como elemento estructural no portante.

En ingeniería civil su uso se centra en elementos de saneamiento prefabricados, encofrados perdidos, pantallas de aislamiento acústico y recubrimiento de túneles. En la Figura 17 se pueden ver dos de estos usos. Se puede apreciar que debido a la gran libertad que da este material en cuanto al diseño de motivos, cenefas, etcétera, se han llegado a producir encofrados perdidos con mosaicos y formas complejas.



Figura 17. Usos del GRC en la ingeniería civil. Encofrado perdido en la estación de metro de Sol y recubrimiento de túneles.

Las aplicaciones del GRC son innumerables en la arquitectura actual. No solo se utilizan paneles planos lisos en su cara vista, sino que pueden adoptar gran cantidad de formas. En la Figura 18 se ven dos usos del GRC en Madrid. Incluso se ha llegado a emplear para rehabilitación de edificios históricos imitando motivos y mosaicos.



*Figura 18. Usos arquitectónicos del GRC. Cerramiento IMAX y torres de acceso y cubierta del estadio Santiago Bernabéu.*

## 5.6 Caracterización del GRC

En la actualidad existe una normativa de ámbito europeo que regula la obtención de las propiedades mecánicas del GRC. La norma UNE-EN 1170-5 fija el método de obtención de las propiedades del material frente a solicitudes de flexión.

## 6. Normativa aplicable para uso estructural del Hormigón reforzado con fibras

### 6.1 Requisitos estructurales según las normativas

Como ya se ha dicho anteriormente, las normativas actuales, como el CM-2010 o la EHE-08, contemplan el posible uso estructural de hormigón reforzado con diferentes tipos de macro-fibras. Para llegar a poder considerar ese comportamiento se emplean diversos ensayos normalizados: resistencia a compresión, resistencia indirecta a tracción y ensayos de flexión. De estos tres tipos, el ensayo de resistencia a tracción por flexión en probetas entalladas es el más empleado para obtener la contribución de las fibras a la resistencia residual del hormigón.

Partiendo de estos ensayos es posible obtener la resistencia a tracción y realizar un análisis inverso para llegar a obtener modelos constitutivos de comportamiento en fractura. La norma EN 14889 define las condiciones mínimas que deben cumplir los fibras de acero y poliolefina para considerar su contribución en el cálculo estructural: "*el fabricante debe declarar el volumen unitario de fibras, en kg/m<sup>3</sup>, que puede alcanzar una resistencia a la flexión residual de 1,5 MPa a 0,5 mm CMOD (crack mouth opening displacement) y una resistencia residual a la flexión de 1,0 MPa a 3,5 mm CMOD*". Con estas premisas, las normas toman en consideración la contribución estructural de las fibras aleatoriamente dispuestas en la masa del hormigón basándose en los resultados de los ensayos según la Figura 19.

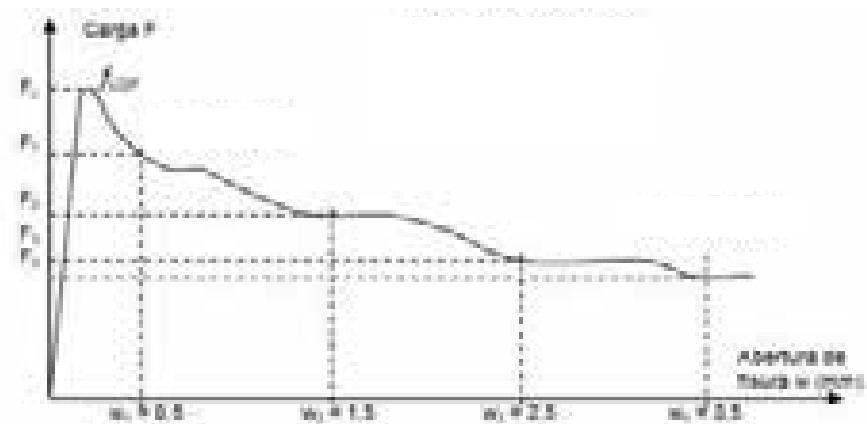


Figura 19. EHE-08. Figura A.14.1 Diagrama tipo carga – abertura de fisuras.

En estos ensayos la carga aplicada se transforma en resistencia residual a una cierta abertura de entalla, de acuerdo con la expresión explicada en el apartado 3.5:

$$f_{R,j} = \frac{3F_j l}{2bh_{sp}^2}$$

Según la norma EHE-08 los requisitos para considerar la contribución estructural de las fibras en el hormigón son:

$$f_{R1}/f_{LOP} > 0,4 \quad y \quad f_{R3}/f_{LOP} > 0,2$$

En tanto que para el CM-2010 se tienen que verificar las expresiones:

$$f_{R1}/f_{LOP} > 0,4 \quad y \quad f_{R3k}/f_{R1k} > 0,5$$

Siendo  $f_R$  la resistencia para determinadas aberturas de fisura:  $f_{LOP}$  en el límite de proporcionalidad,  $f_{R1}$  para 0,5 mm y  $f_{R3}$  para 2,5 mm.

Como se puede ver, estos requisitos relacionan resistencias y abertura de fisura. Las curvas carga-CMOD se obtienen conforme a la norma EN 14651:2007+A1 lo que permite obtener no sólo los valores de resistencia para ser utilizados en el diseño estructural, sino también los valores clave para tener en cuenta la contribución de las fibras.

## 6.2 Comportamiento a flexión. Modelos constitutivos

Las normativas contemplan el uso estructural de las fibras aleatoriamente dispuestas en el hormigón como elementos de refuerzo. Dichas normativas basan la contribución estructural en función de la experimentación y el conocimiento del comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero. Es por esto que se incluyen dos apartados en este punto, el primero relacionado con lo indicado por las normativas en referencia a los HRFA y un segundo donde se expone el comportamiento de los hormigones reforzados con fibras de poliolefina.

El CM-2010 y la EHE-08 marcan los requisitos mínimos que debe cumplir el HRF para poder considerar el carácter estructural de las fibras. La Figura 20 muestra los dos tipos de comportamiento del HRF según el CM-2010, en función de la cuantía y tipología de fibras.

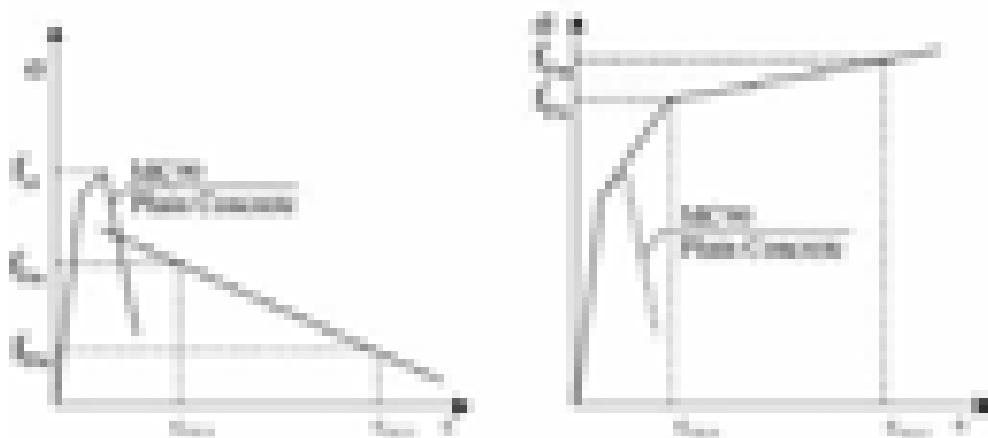


Figura 20. Comportamiento de ablandamiento (izquierda) y de endurecimiento (derecha) del HRFA según CM2010.

Respecto a los modelos constitutivos aportados por la normativa EHE-08 podemos indicar que aporta un primer modelo de tipo lineal, según se muestra en la Figura 21. La EHE-08 presenta un modelo rectangular de tensión-deformación con un valor de  $f_{ctR,d} = 0,33 f_{R,3,d}$ , con deformaciones del 20% para secciones a flexión y del 10% para tracción. Por su parte el CM-2010 en este primer modelo presenta un diagrama rígido-plástico similar, donde los valores de tensión máxima se definen en función del comportamiento del material y toma un valor de  $f_{ctR,d}$  de un tercio del obtenido para  $f_{R,3,d}$ .



Figura 21. Diagrama tensión-deformación lineal según la EHE-08.

En el segundo modelo la EHE-08, según se muestra en la Figura 22, presenta un modelo multilineal que es el usado en pequeñas deformaciones en estados de servicio y que requiere de una gran definición en la zona del gráfico tensión-deformación limitada por los puntos A-B-C. En la Figura 22 se puede ver la definición de la tensión pico  $f_{ct,d}$  y de dos tensiones residuales  $f_{ctR1,d}$  y  $f_{ctR3,d}$  asociadas a diferentes deformaciones.

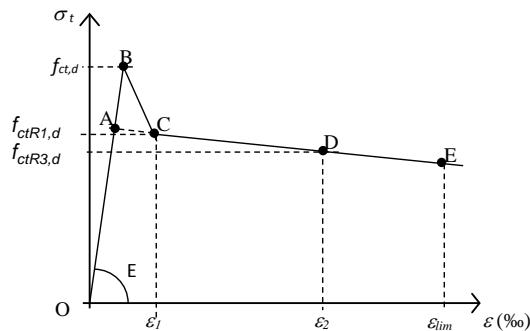


Figura 22. Diagrama tensión-deformación multilineal según la EHE-08.

Por su parte el CM-2010, según se puede ver en la Figura 23 presenta un modelo lineal con dos valores de tensión correspondientes al estado límite de servicio,  $f_{Fts}$ , y al estado límite último,  $f_{Ftu}$ .

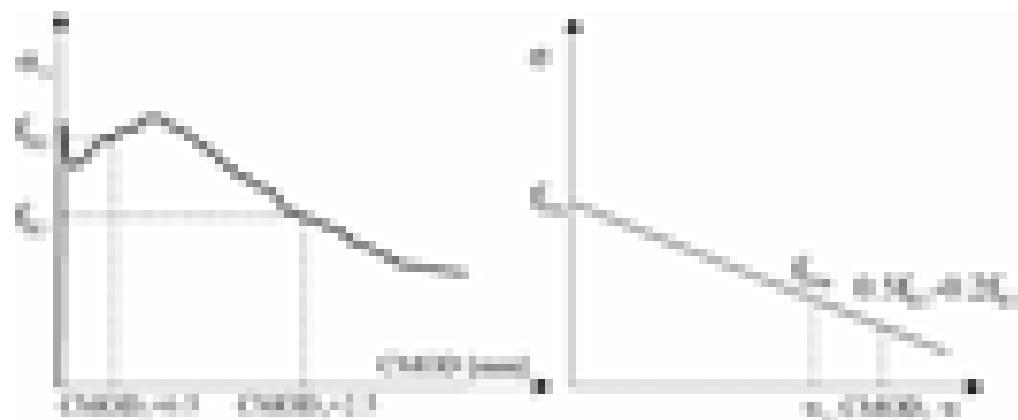


Figura 23. Modelo constitutivo post-fisuración según el CM-2010.

## 6.2.2 Hormigón reforzado con fibras de poliolefina

Para poder llegar a definir un modelo constitutivo del comportamiento del HRFP se han empleado resultados experimentales de hormigones con diferentes cuantías, tipos de hormigón, métodos de vertido y compactación y reología. Los resultados de ensayos de flexión en tres puntos, según la norma EN14651 junto a los resultados numéricos obtenidos con un programa de elementos finitos mediante análisis inverso mostrados en la Figura 24 dieron lugar a los modelos constitutivos que aparecen en la Figura 25. La Figura 24 muestra que el modelo es válido para hormigones reforzados con fibras de poliolefina que van desde el de rendimiento bajo al superior, pasando por el medio correspondiendo todos ellos a un hormigón con  $6 \text{ kg/m}^3$  de fibras. También se puede observar la dispersión que muestra un hormigón de estas características.

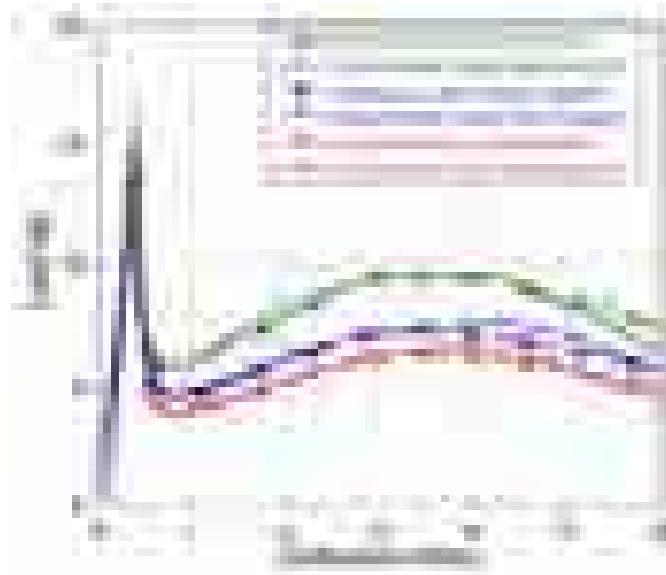


Figura 24. Modelos constitutivos obtenidos experimental y numéricamente.

El modelo que se implementó para conseguir el análisis mediante elementos finitos se comportó elásticamente hasta alcanzar la resistencia máxima a tracción, siendo nula la abertura de fisura hasta dicho punto. Tras superar su resistencia a tracción, el material se comporta según la función de ablandamiento mostrada en la Figura 25. Como se mencionó antes, las relaciones constitutivas propuestas por las normativas son funciones bi o trilineales de ablandamiento, por tanto funciones que no representan de manera correcta la rama de recarga en el ensayo de fractura en HRFP. Tras la primera descarga se produce otra rama, en este caso de carga, que representa el puente de fibras entre los labios de la fisura. Esta rama de recarga intermedia depende del tipo de fibras empleadas y se mantiene hasta el fallo o arrancamiento de la fibra. La Figura 25 muestra el esquema de descarga para HRFP según el modelo trilineal propuesto.

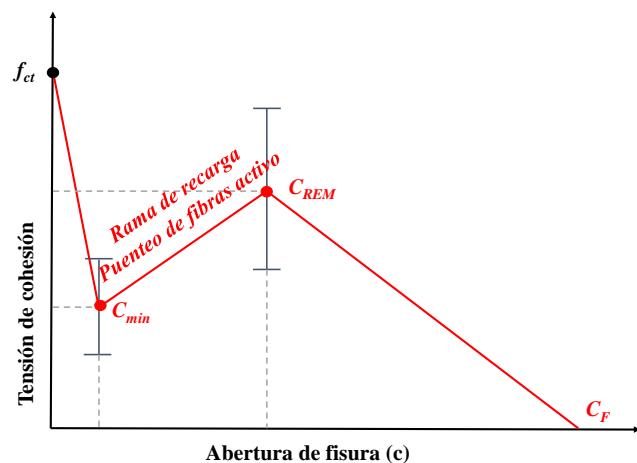


Figura 25. Curva trilineal para definir el comportamiento del HRFP.

Llegados a este punto, parece obligado comparar el enfoque dado por las normas, basado HRFA con la relación constitutiva propuesta para HRFP. La comparación entre lo propuesto por el CM-2010 y la ley trilineal para HRFP se puede ver en la Figura 26. En ella se pueden llevar a cabo consideraciones nuevas de cara a mejorar las aplicaciones estructurales del HRFP. El código modelo indica dos modelos constitutivos, el primero es un modelo rígido-plástico lineal y el segundo es un modelo bilineal. Como puede verse en la Figura 26 el modelo constitutivo sobreestima las aperturas de fisura iniciales (relacionadas con estados límites de servicio) y subestima los valores para mayores aberturas (asociados a los estados de límites últimos).



Figura 26. Comparativa entre las relaciones constitutivas propuestas por el CM-2010 para HRFA y el modelo propuesto para HRFP.

### 6.3 Comportamiento a cortante

Cabe mencionar que una vez que se cumplen los requisitos exigidos por la normativa en relación a la resistencia a tracción por flexión, el aporte estructural de las fibras puede considerarse también en el diseño en estado límite a cortante. Los valores indicados por las normas para el diseño estructural en estado límite de cortante se basan en resistencia a la tracción por flexión residual,  $f_{R3}$  y  $f_{R1}$ . Este aspecto es sumamente interesante por su interés práctico, ya que se relaciona principalmente con la posibilidad de reemplazar parcial o totalmente la armadura de cercos.

El CM-2010 y la EHE-08 proponen una formulación aditiva para elementos sin cercos muy similar. La que se indica a continuación es la expresión según la norma española:

$$V_{rd} = V_{cu} + V_{fu} = \left[ \frac{0.18}{\gamma_c} \varepsilon (100 \rho_1 f_{cv})^{1/3} + 0.15 \sigma'_{cd} \right] b_0 d + 0.7 \varepsilon \tau_{fd} b_0 d$$

Es reseñable que el valor obtenido según la fórmula indicada depende del efecto tamaño del elemento estructural, la resistencia a compresión y la resistencia a tracción del hormigón, la resistencia residual de las fibras y del refuerzo longitudinal de acero en el elemento estructural.

Según la fórmula anterior,  $\gamma_c$  es el coeficiente de seguridad del hormigón,  $\varepsilon$  es el factor de efecto tamaño ( $\varepsilon = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2.0$  – con “d” en mm),  $\rho_1 \leq 0,02$  es la cuantía de armadura longitudinal,  $f_{cv}$  la resistencia a cortante del hormigón =  $f_{ck}$ ,  $\sigma'_{cd}$  es la tensión media debida a esfuerzo axil y  $\tau_{fd}$  el valor de cálculo debido a las fibras  $\tau_{fd} = 0.5 f_{ctR,d}$ , siendo  $f_{ctR,d} = 0.33 f_{R,3,d}$ .

No existen ensayos normalizados para evaluar la resistencia a cortante del HRF. Por este motivo, y para poder evaluar el comportamiento de los HRF a cortante se han realizado ensayos sobre probetas tipo push-off. Con estos ensayos se han podido comparar los resultados numéricos obtenidos con la formulación de las normas y el comportamiento en ensayos de laboratorio.

El ensayo en fractura en Modo II tipo push-off, como se muestra en la Figura 27, consiste en aplicar una carga vertical concentrada a lo largo de una sección de ligamento, también vertical. Para ello, se realizan dos entallas a una probeta prismática, que generan esa sección vertical de ligamento y que posibilitan un desplazamiento a cortante

durante el ensayo de hasta 9 mm. La carga se transmite mediante dos barras de acero colocadas encima y debajo de la probeta, perfectamente alineadas con la sección de ligamento.



Figura 27. Probeta push-off

Si indicamos por ejemplo una viga de dimensiones normales en edificación, sin esfuerzo axil, con un ancho de 30 cm y canto útil que oscile entre 20 y 55 cm, y dos valores de cuantía de armadura longitudinal de tracción de 0,01 y 0,02 podemos obtener los resultados mostrados en la Figura 28. En dicha Figura 28 se muestran las gráficas cortante-canto útil, para un hormigón autocompactante con 10 kg/m<sup>3</sup> de fibras de poliolefina, donde se puede apreciar que para desplazamientos a cortante pequeños los valores facilitados por las normativas superan ampliamente a los resultados experimentales. Por el contrario, para desplazamientos grandes (unos 2,5 mm) los valores aportados por las normativas superan en todos los casos a los resultados experimentales.

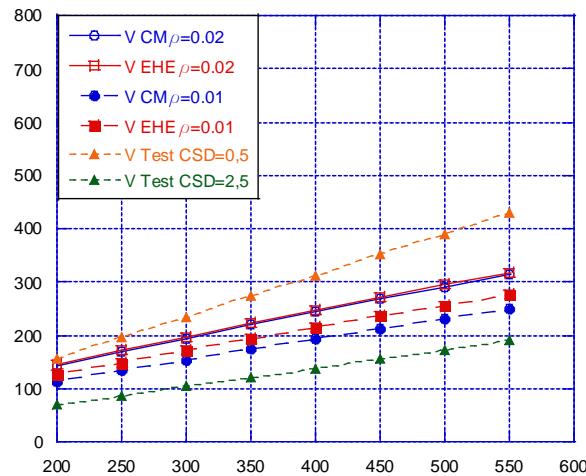


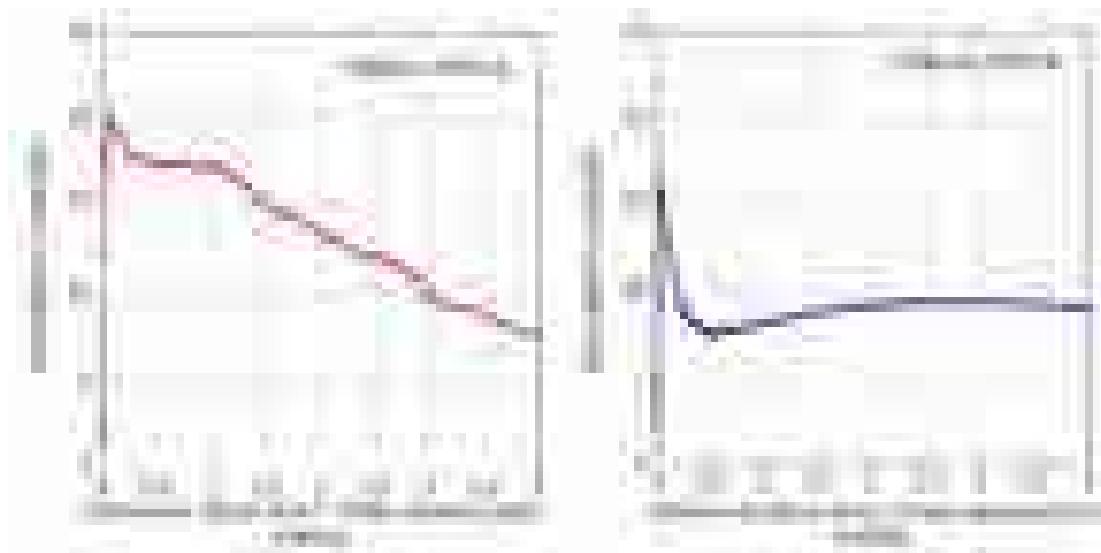
Figura 28. Curvas cortante-canto útil según La EHE-08, el CM-2010 y experimental (Picazo, et al., 2018).

Según estos resultados cabe destacar que, para desplazamientos de 2,5 mm a cortante, las normas aportan valores superiores a los valores experimentales obtenidos en laboratorio.

Para obtener los resultados indicados en la Figura 28 se asumieron varias consideraciones. El primero fue tomar el coeficiente de minoración de la resistencia del hormigón  $\gamma_c=1$ . Además se consideraron dos valores para el refuerzo longitudinal,  $\rho_l=0,01$  y  $0,02$ . Por último, se consideró que no existe esfuerzo axil en la viga.

### 7.1 Ejercicio 1

Dadas las curvas medias de 6 ensayos de resistencia a la tracción por flexión con dos tipos de hormigón reforzado con fibras, A y B:

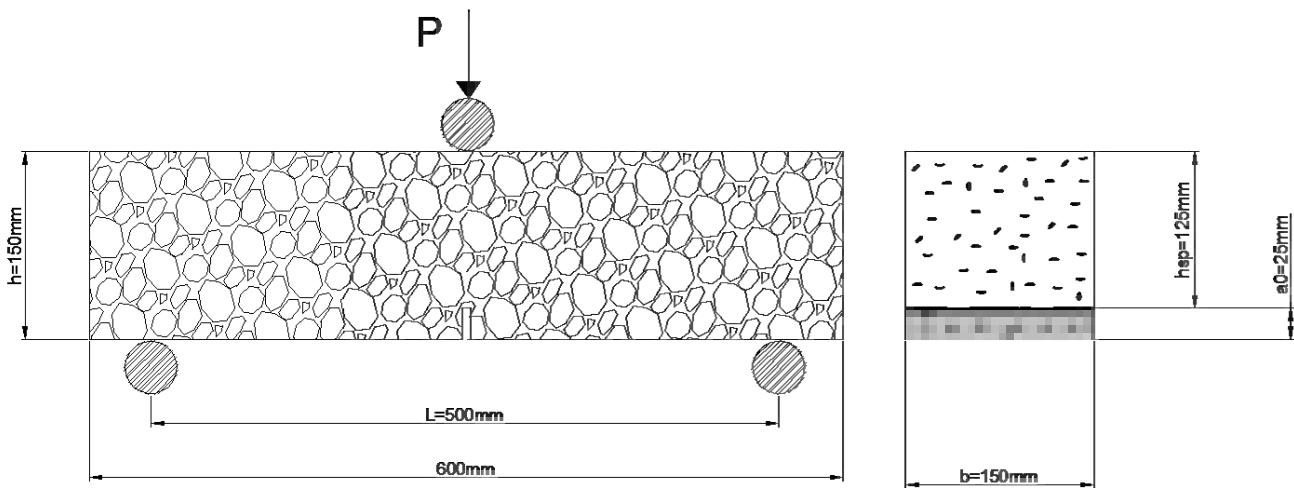


Se pide:

1. Interpretar las curvas aportadas y relacionar con el refuerzo de qué tipo de fibras se corresponde cada una de ellas. Comparar los puntos singulares de las curvas aportadas y comentar las posibles justificaciones para dichas diferencias.
2. Comentar brevemente cómo podría afectar la aportación de dichas fibras al comportamiento en estado fresco y la resistencia a compresión.
3. Definir “fibra estructural” y evaluar la aptitud estructural de ambos tipos de hormigón reforzado con fibras, A y B.
4. Definir el modelo simplificado de la EHE-08 para ambas tipologías y obtener los valores de  $f_{R1}$ ,  $f_{R3}$  y  $f_{LOP}$  (se aporta esquema de ensayo).
5. Comentar tres condicionantes o requerimientos de proyecto que implicarían que la opción óptima fuese el hormigón tipo A y otros tres que pudieran justificar la elección del hormigón tipo B.

NOTA: Considerense las curvas como características de cada hormigón.

Esquema de ensayo:



$$\text{Formulación: } \theta = n \frac{A_f}{V_f A} ; f_{ct,j} = \frac{3}{2} \frac{F_f L}{b \cdot h_{sp}^2} ; G_f = \frac{W_f}{b \cdot h_{sp}}$$

**1. Interpretar las curvas aportadas y relacionar con el refuerzo de qué tipo de fibras se corresponde cada una de ellas. Comparar los puntos singulares de las curvas aportadas y comentar las posibles justificaciones para dichas diferencias.**

Las curvas representadas en el enunciado del ejercicio se corresponden con las curvas medias obtenidas de manera experimental en ensayos a tracción por flexión de dos hormigones reforzados con fibras. En el eje de abcisas se encuentran representados los diferentes valores de abertura de fisura, medida por medio de un CMOD dispuesto en los labios de la entalla. En el eje de ordenadas se refleja la fuerza medida mediante por la máquina de ensayo.

Desconocida la composición de la matriz de hormigón, se puede entender que la diferencia de carga máxima entre el hormigón con fibras tipo A y el tipo B es debido a diferencias en la dosificación del hormigón, ya que este valor normalmente es gobernado por las propiedades de la matriz en dosificaciones habituales de fibras.

Por la forma de la curva, se puede decir que en el caso de las fibras tipo A estamos ante fibras metálicas. Por otro lado, en el caso de la fibra tipo B estamos ante un hormigón reforzado con fibras de poliolefina, que no aumentan la carga máxima del hormigón sin reforzar y presenta una caída de resistencia tras alcanzar el límite de proporcionalidad. Después de la rama de carga, tras alcanzar su máximo valor, se produce en ambos casos una rama de descarga, lo que nos permite concluir que ambas curvas presentan un comportamiento típico de dosificaciones medias de fibras. En el caso de las fibras tipo A, ya que con fibras de acero podría incluso llegar a tener endurecimiento (resistencias superiores a las del límite de proporcionalidad), podría tratarse de una cuantía en el entorno de 30kg/m<sup>3</sup>. En el caso de las fibras tipo B, la caída es mucho más acentuada, llegando a bajar hasta la mitad de la carga pico y presenta una recuperación muy moderada, lo que permite pensar que la dosificación puede estar en el entorno de 5-6 kg/m<sup>3</sup>. Esta diferencia de comportamiento y de caída de carga se corresponde con el tipo de fibra y su mayor o menor módulo de elasticidad. Este dato también indica que las fibras tipo A son metálicas, en tanto que las tipo B son de poliolefina.

Tras la caída de carga, el hormigón con fibras tipo A aumenta su abertura de fisura a la vez que disminuye progresivamente su carga, comportamiento que corresponde con una fibra metálica. Por el contrario en el hormigón con fibras tipo B se produce una rama de recarga hasta que la abertura de fisura se sitúa en el entorno de los 2,5mm, abertura a partir de la cual aumenta su abertura y disminuye su carga residual. Este comportamiento es el esperado para una fibra de poliolefina.

**2. Comentar brevemente cómo podría afectar la aportación de dichas fibras al comportamiento en estado fresco y la resistencia a compresión.**

En estado fresco la aportación de las fibras afecta al hormigón, sobre todo desde el aspecto de su trabajabilidad. La adición de fibras en el hormigón no requiere de una maquinaria específica, pero sí que afecta a la colocación del mismo y al método de compactación. Lo esperable es que las fibras de acero (A) afecten en mayor medida a la trabajabilidad que las fibras de poliolefina (B) debido a su mayor rigidez.

En lo referente a la hormigonera se podría indicar que las fibras metálicas producen un mayor desgaste sobre la máquina que las fibras de poliolefina, debido a la dureza del material y a que las fibras de poliolefina pueden doblarse, en tanto que las de acero mantienen su forma.

Otra diferencia entre los dos tipos de fibras es que en las fibras de poliolefina no suelen producirse un aglutinamiento de estas y por tanto no se producen “madejas”, como puede ocurrir en las fibras metálicas.

Respecto de la resistencia a compresión es de destacar lo indicado antes al analizar las gráficas facilitadas de los hormigones. Con respecto a un hormigón con la misma composición, las fibras de poliolefina (B) no producen incrementos de resistencia, en tanto que las fibras de acero mejoran dicha resistencia. En el caso de las fibras de acero (A) tampoco se suelen apreciar variaciones reseñables si la compactación es correcta y para dosificaciones medias de fibras como la que se muestra en la figura.

**3. Definir “fibra estructural” y evaluar la aptitud estructural de ambos tipos de hormigón reforzado con fibras, A y B.**

Se pueden definir como fibras estructurales aquellas que cumplen los requisitos establecidos en la normativa, EHE-08 y CM2010 principalmente, para tener en cuenta la contribución de las fibras en el cálculo estructural. Estos requisitos se basan en los resultados de los ensayos de resistencia a la tracción por flexión como los que se muestran en el enunciado. Se puede considerar una dosificación de fibras como estructural si se obtiene una resistencia  $f_{R1}$  no inferior al 40% de  $f_{LOP}$  siempre que simultáneamente  $f_{R3}$  sea superior al 20% de  $f_{LOP}$ .

Además, es conveniente comprobar la aptitud estructural de un hormigón reforzado con fibras en relación a las normas EN14889-1 para fibras de acero y EN14889-2 para fibras poliméricas. En estas normas se indica: “El fabricante debe declarar el volumen unitario de fibras, en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , que consiga alcanzar una resistencia residual a la flexión de 1,5 MPa a 0,5 mm CMOD y una resistencia residual a flexión de 1,0 MPa a 3,5 mm CMOD”.

Para verificar esas condiciones en términos de resistencia, emplearemos la fórmula:  $f_{ct,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot L}{2 \cdot b \cdot h_{sp}}$

En la siguiente tabla se han calculado las resistencias residuales de los dos hormigones comprobándose que cumplen todos los requisitos comentados anteriormente:

Hormigón		CMOD (mm)	Fuerza (kN)	$f_{ct,j}$ (MPa)	requisitos
Tipo A	$f_{LOP}$	<0,30	20,5	6,56	
	$f_{R1}$	0,5	17,5	5,60	> 1,5 MPa
	$\%f_{LOP}$			85%	>40% $f_{LOP}$
	$f_{R3}$	2,5	12	3,84	
	$\%f_{LOP}$			59%	>20% $f_{LOP}$
	$f_{R4}$	3,5	9	2,88	> 1,0 MPa
	$\%f_{LOP}$			44%	
Tipo B	$f_{LOP}$	<0,30	16,2	5,18	
	$f_{R1}$	0,5	7,5	2,4	> 1,5 MPa
	$\%f_{LOP}$			46%	>40% $f_{LOP}$
	$f_{R3}$	2,5	9,5	3,04	
	$\%f_{LOP}$			59%	>20% $f_{LOP}$
	$f_{R4}$	3,5	9,3	2,98	> 1,0 MPa
	$\%f_{LOP}$			58%	

Como conclusión cabe decir que los dos tipos de hormigón tienen aptitud estructural.

#### 4. Definir el modelo simplificado de la EHE-08 para ambas tipologías y obtener los valores de $f_{R1}$ , $f_{R3}$ y $f_{LOP}$ (se aporta esquema de ensayo).

La EHE-08 indica dos modelos constitutivos que definen el comportamiento de los hormigones reforzados con fibras. El modelo simplificado es el que se indica en la figura siguiente:



Para obtener la resistencia en el límite de proporcionalidad y las residuales R1 y R3 empleamos la misma fórmula:  $f_{ct,j} = \frac{3 \cdot f_{j,L}}{2 \cdot b \cdot h_{sp}}$

Con los resultados que se mostraron en la tabla anterior, siendo  $f_{LOP}$  es la resistencia en el límite de proporcionalidad,  $f_{R1}$  es la resistencia residual para un CMOD de 0,5 mm y  $f_{R3}$  para un CMOD de 2,5 mm., podría suponerse un valor de  $f_{R3,d}$  sin minorar, obteniendo:

Para el hormigón Tipo A:  $f_{ctR,d} = 3,84/3 = 1.28$  MPa

Para el hormigón Tipo A:  $f_{ctR,d} = 3,04/3 = 1.01$  MPa

**5. Comentar tres condicionantes o requerimientos de proyecto que implicarían que la opción óptima fuese el hormigón tipo A y otros tres que pudieran justificar la elección del hormigón tipo B.**

Para la opción óptima del hormigón tipo A:

- La estructura se sitúa en zona sísmica, trabajando mejor estas fibras para pequeñas aberturas de fisura.
- La estructura puede estar sometida a efectos de impacto.
- La estructura requiere importantes resistencias mecánicas.

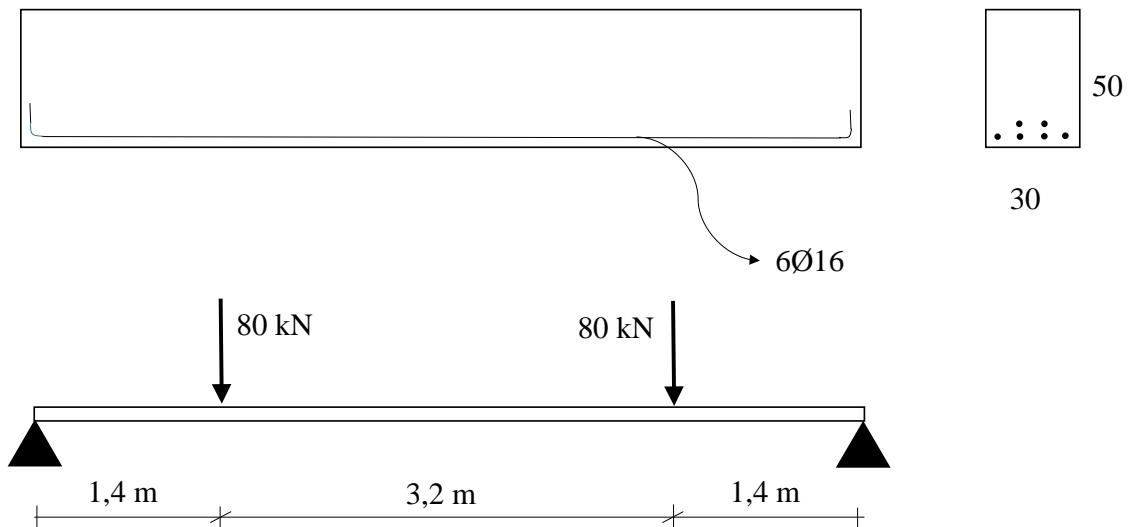
Para la opción óptima del hormigón tipo B:

- Se desea realizar una estructura con menor peso.
- La estructura se encuentra en un ambiente marino.
- Se va a emplear hormigón proyectado y es preferible, por el menor desgaste que se produce en los equipos.



## 7.2 Ejercicio 2

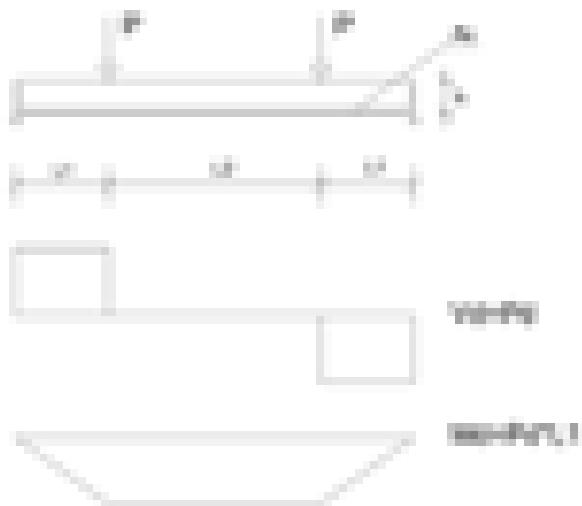
Una viga de hormigón HA-30, simplemente apoyada con una luz de 6m, tiene un canto total de 50 cm y un canto útil de 44 cm. En un primer diseño, se armó a flexión con 6 barras de acero B400S de diámetro Ø16 para soportar una carga última segúen el esquema de cargas que se acompaña de 80 kN (coeficiente de mayoración de cargas 1,5). Por problemas de ejecución se quiere evitar armar con armadura longitudinal superior y si es posible poner cercos de cortante. Con el fin de facilitar la ejecución se plantea utilizar solamente barras de acero de tracción, sin cercos ni barras en la cara superior. Para estudiar dicha posibilidad, se podría contar con un hormigón reforzado con fibras de acero HAF-30/A-3-3/F/25-65/IIa.



En el proceso de optimización de armado se pide:

- Momento último y carga última con hormigón armado en Estado Límite Último de Flexión.
- Momento último y carga última con hormigón armado en Estado Límite Último de Cortante.
- Momento último y carga última con hormigón armado reforzado con fibras en Estado Límite Último de Flexión.
- Momento último y carga última con hormigón armado reforzado con fibras en Estado Límite Último de Cortante.
- Discutir cuál sería la solución óptima.

## SOLUCIÓN EJERCICIO 2



## DATOS:

L1= 1,4 m L2= 3,2 m

Sección:  $b = 30 \text{ cm}$     $h = 50 \text{ cm}$     $d = 44 \text{ cm}$

Hormigón: HA-30      Acero: B400S

A<sub>s</sub> = 6 Ø 16

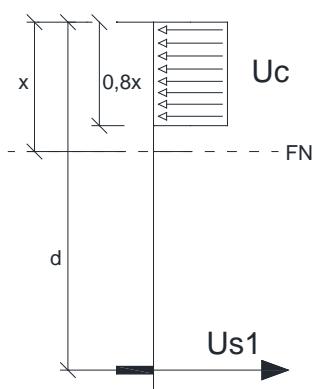
$$E_s = 200.000 \text{ MPa} \quad E_c = 30.000 \text{ MPa}$$

$$P = 80 \text{ kN} \quad \gamma_f = 1,5$$

$$V_d = P_d = \gamma_f \cdot P = 1,5 \cdot 80 = 120 \text{ kN}$$

$$M_d \equiv P_d \cdot L_1 \equiv 120 \cdot 1.4 \equiv 168 \text{ mKN}$$

a)  $M_u$  y  $P_u$  para HA-30 y ELU de flexión (ver Anejo 7 EHE-08).



$$U_c = f_{cd} bd \Rightarrow b f_{cd} = \frac{U_c}{d}$$

$$\Sigma FH = 0 \quad \Rightarrow \quad 0,8x f_{cd} b = U_{s1} \quad (1)$$

$$\Sigma M_u \quad \Rightarrow \quad 0,8f_{cd}bx(d - 0,4x) = M_u \quad (2)$$

$$\text{De (1)} \quad 0,8x \frac{U_c}{d} = U_{s1} \quad \Rightarrow \quad x = \frac{U_{s1}}{0,8U_c} d$$

Sustituimos en (2)  $0,8 \frac{U_c}{d} x(d - 0,4x) = M_u \Rightarrow M_u = 0,8 \frac{U_c}{d} \frac{U_{s1}d}{0,8U_c} (d - 0,4 \frac{U_{s1}d}{0,8U_c}) \Rightarrow$

$$\Rightarrow M_u = U_{s1} \left( 1 - \frac{U_{s1}}{2U_c} \right) d \quad \Rightarrow \quad M_u = A_s f_y d \left( 1 - \frac{A_s f_y d}{2f_{c,d} b d} \right) d$$

Calculamos las resistencias de cálculo

$$f_{yd} = f_y / \gamma_s = 400 / 1.15 = 348 \text{ MPa} = 34,8 \text{ kN/cm}^2$$

$$f_{cd} = f_k / \gamma_c = 30 / 1.5 = 20 \text{ MPa} = 2,0 \text{ kN/cm}^2$$

Calculamos las capacidades mecánicas

$$U_{s1} = n^o \frac{\pi \phi^2}{4} f_{yd} = 6 \frac{\pi \cdot 16^2}{4} 348 = 419817 \text{ N} = 419,8 \text{ kN}$$

$$U_c = f_{cd}bd = 2,0 \cdot 30 \cdot 44 = 2640 \text{ kN}$$

Y el momento último que soporta la sección será

$$M_u = U_{s1} \left( 1 - \frac{U_{s1}}{2U_c} \right) d = 419,8 \left( 1 - \frac{419,8}{2 \cdot 2640} \right) 0,44 = 170 \text{ mkN}$$

Por tanto se verifica que  $M_u > M_d$  ( $170 > 168$ ). La sección cumple.

Comprobamos si  $M_u < M_{lim}$ , lo que evita disponer de armadura superior de compresión.

$$M_{lim} = 0,375 f_{cd} b d^2 = 0,375 \cdot 2,0 \cdot 30 \cdot 44^2 \cdot 10^{-2} = 435,6 \text{ mkN}$$

$$P_u = \frac{M_u}{L_1} = \frac{170}{1,4} = 121,43 \text{ kN} > P_d = 120 \text{ kN}$$

**b) ELU de cortante con HA-30 (ver Art. 44 EHE-08).**

Se deben cumplir las condiciones:

$$V_d \leq V_{u1} \quad \text{Por compresión oblicua en el alma}$$

$$V_d \leq V_{u2} \quad \text{Por tracción en el alma}$$

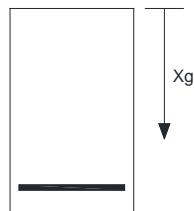
$$V_d = 120 \text{ kN} \quad V_{u1} = 0,30 f_{cd} b_0 d = 0,30 \cdot 2,0 \cdot 30 \cdot 44 = 792 \text{ kN} \quad \text{Por tanto cumple}$$

Según el Art. 44.2.3.2.1; piezas sin armadura de cortante

Para la segunda comprobación:

Calculamos el momento de fisuración. Para ello necesitamos calcular la inercia.

$$A_c = b \cdot h + (E_s/E_c - 1) \cdot n^0 \phi \cdot A_\phi = 50 \cdot 30 + (200000/30000 - 1) \cdot 6 \cdot 2,01 = 1568 \text{ cm}^2$$



$$x_g = \frac{50 \cdot 30 \cdot 25 + \left( \frac{200000}{30000} - 1 \right) \cdot 6 \cdot 2,01 \cdot 44}{1568} = 25,83 \text{ cm}$$

$$I_h = \frac{1}{12} \cdot 30 \cdot 50^3 + 30 \cdot 50 \cdot (25,83 - 25,00)^2 + \left( \frac{200000}{30000} - 1 \right) \cdot (6 \cdot 2,01 \cdot (44 - 25,83))^2 =$$

$$I_h = 33,61 \text{ dm}^4$$

$$\text{Según el art. 39.1: } f_{ctm} = 0,30 f_{ck}^{2/3} \text{ (si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa)} = 0,30 \cdot 30^{2/3} = 2,90 \text{ MPa}$$

$$\text{Además } f_{ctm,l} = \max (1,6 \cdot h / 1000) f_{ctm} \text{ o } f_{ctm}$$

$$f_{ctm,l} = (1,6 \cdot 500 / 1000) \cdot 2,90 = 3,19 \quad \Rightarrow \quad f_{ctm,l} = 3,19 \text{ MPa}$$

$$M_{fis} = \frac{I_h}{h - x_g} f_{ctm,l} = \frac{33,61}{(50 - 25,83)} 3,19 \cdot 10 = 44,30 \text{ mkN}$$

Por tanto, según el Art. 44.2.3.2.1.2, la viga está en región fisurada.

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su} \quad V_{cu} = \left[ \frac{0,18}{\gamma_c} \varepsilon (100 \rho_1 f_{cv})^{1/3} \right] bd \quad V_{su} = 0$$

$$\varepsilon = \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) < 2 \quad \varepsilon = \left( 1 + \sqrt{\frac{200}{440}} \right) = 1,67$$

$$\rho_1 = \frac{A_s}{b \cdot d} \leq 0,02 \quad \rho_1 = \frac{6 \cdot 2,01}{30 \cdot 44} = 0,0091 \quad f_{cv} = f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$\text{Así} \quad V_{u2} = \left[ \frac{0,18}{1,5} 1,67 (100 \cdot 0,0091 \cdot 30)^{1/3} \right] 30 \cdot 44 + 0 = 79,65 \text{ kN}$$

Por tanto  $V_d > V_{u2} \Rightarrow$  Es necesaria armadura a cortante.

**c) Con HAF-30/A-3-3/F/25-65/IIa. ELU de flexión.**

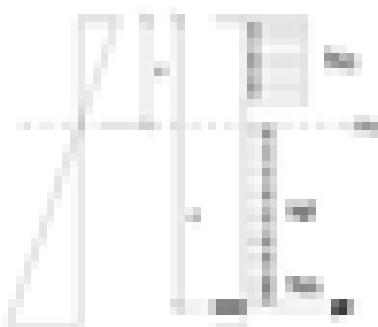
Según la designación del hormigón tenemos que:  $f_{R,3,k} = 3 \text{ MPa}$

Según la Figura 5.6-7 del CM2010 (equivalente a EHE-08 A.14.2), se tomará un tercio de  $f_{R,3,d}$ .



$$f_{ctR,d} = 0,333 f_{R,3,d} = 0,333 \frac{f_{R,3,k}}{\gamma_c} = 0,333 \frac{3}{1,5} = 0,666 \text{ MPa}$$

$$f_{ctR,d} = 0,0666 \text{ kN/cm}^2$$



$$\sum F_H = 0 \quad 0,8x f_{cd} b = N_F + N_s$$

$$\sum M_{N_s} \Rightarrow 0,8x f_{cd} b (d - 0,4x) = N_F \left( \frac{d - x}{2} \right) = M_d$$

$$N_F = f_{ctR,d} (d - x) b$$

De la primera ecuación:  $0,8 \cdot x \cdot 2,0 \cdot 30 = 0,0666 \cdot (44 - x) \cdot 30 + 419,8 \Rightarrow x = 10,15 \text{ cm}$

Sustituyendo en la segunda:  $M_d = 0,8 \cdot 10,14 \cdot 2,0 \cdot 30 \cdot (44 - 0,4 \cdot 10,14) - 0,066 \cdot \frac{(44 - 10,14)^2}{2} \cdot 30$

$$M_d = 18306,5 \text{ cm kN} = 183,14 \text{ m kN}$$

Calculamos el aumento a flexión debido a las fibras

$$M_d / M_u = 183,14 / 170,00 = 1,077 \Rightarrow \text{incremento del 7,7\%}$$

d) Con HAF-30/A-3-3/F/25-65/IIa. ELU de cortante (ver Anexo 14.44.2.3.2.3 EHE-08).

$$V_d \leq V_{u2} = V_{cu} + V_{su} + V_{fu} \quad V_{cu} = 79,65 \text{ kN} \quad V_{su} = 0$$

$$V_{fu} = 0,7 \varepsilon \tau_{fd} bd ; \quad \tau_{fd} = 0,5 f_{ctR,d} = 0,333 \text{ MPa}$$

$$V_{fu} = 0,7 \cdot 1,67 \cdot \frac{0,333}{10} \cdot 30 \cdot 44 = 51,38 \text{ kN}$$

$$V_{u2} = 79,65 + 0 + 51,38 = 131,03 \text{ kN} > V_d = 120,00$$

Calculamos el aumento a cortante debido a las fibras

$$\frac{V_d}{V_{cu}} = \frac{131,03}{79,65} = 1,645 \Rightarrow \text{incremento de 64,5\%}$$

Comprobamos la cuantía mínima

$$V_{su} + V_{fu} > \frac{f_{ct,m}}{7,5} bd = \frac{2,90}{7,5 \cdot 10} \cdot 30 \cdot 44 = 51,04$$

Por tanto cumple cuantía mínima.

## Bibliografía de referencia

- ACHE, 2000. Monografía M-2. Manual de tecnología del hormigón reforzado con fibras de acero.
- ACI Committee 544, 2008. ACI 544.3R-08 .Guide for specifying, proportioning, and production of fiber reinforced concrete. *Farmington Hills: American Concrete Institute*.
- AENOR, 2008. *UNE EN 14651. Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de Proporcionalidad (LOP), resistencia residual)*. s.l.:s.n.
- Alberti, M. G., 2013. *Respuesta mecánica de un hormigón autocompactante reforzado con fibras de poliolefina*. Madrid: TFM, ETSICCP Universidad Politécnica de Madrid..
- Alberti, M. G., A. Enfedaque , Gálvez, J., s.f. *Polyolefin-based fibres and combination with steel fibres: seeking a more sustainable structural concrete*. Madrid, s.n., pp. 423-434.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A. , Gálvez, J., 2015. Improving the Reinforcement of Polyolefin Fiber Reinforced Concrete for Infrastructure Applications. *Fibers*, Volume 3(4), pp. 504-522.
- Alberti, M. G., 2015. *Polyolefin fibre-reinforced concrete: from material behaviour to numerical and design considerations*, s.l.: s.n.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., 2014. On the mechanical properties and fracture behavior of polyolefin fiber-reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, Volume Volume 55, pp. 274-288.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A. Gálvez, J. C., 2016. Fracture mechanics of polyolefin fibre reinforced concrete: Study of the influence of the concrete properties, casting procedures, the fibre length and specimen size. *Engineering Fracture Mechanics*.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A. Gálvez, J. C., 2016. On the prediction of the orientation factor and fibre distribution of steel and macro-synthetic fibres for fibre-reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., 2018. A review on the assessment and prediction of the orientation and distribution of fibres for concrete. *Composites Part B: Engineering*.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., 2018. Polyolefin Fibres for the Reinforcement of Concrete. En: *Alkenes* . s.l.:InTech.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C. , Agrawal, V., 2016. Reliability of polyolefin fibre reinforced concrete beyond laboratory sizes and construction procedures. *Composite Structures*, Volumen 140(15), pp. 506-524.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C. , Ferreras, A., 2016. Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrixes. *Construction & Building Materials*.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C. , Pinillos, L., 2017. Structural Cast-in-Place Application of Polyolefin Fiber-Reinforced Concrete in a Water Pipeline Supporting Elements. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, Volume 8(4).
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C. , Reyes, E., 2016. Numerical modelling of the fracture of polyolefin fibre reinforced concrete by using a cohesive fracture approach. *Composites Part B: Engineering*.

Bentur, A. , Mindess, S., 2006. *Fibre reinforced cementitious composites*. s.l.:Taylor & Francis.

CNR-DT 204, 2006. *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture Fibrorinforzante*, Roma: Consiglio Nazionale delle Ricerche.

EN 14651:2005+A1:2007, 2007. *Test method for metallic fibre concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*. s.l.:s.n.

Enfedaque, A., Alberti, M.G., Gálvez, J.C. , Domingo, J., 2017. Numerical simulation of the fracture behaviour of glass fibre reinforced cement. *Construction and Building Materials*, Volume 136, pp. 108-117.

Enfedaque, A., Paradela, L. , Sánchez-Gálvez, V., 2012. An alternative methodology to predict aging effects on the mechanical properties of glass fiber reinforced cements (GRC). *Construction and Building Materials*, Volumen 27(1), p. 425–431.

López, J. A. et al., 2014. First Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Footbridge in Spain: Design and Construction. *Structural Engineering International*, Volume 24(1), pp. 101-104.

Ministerio de Fomento, 2008. *Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)*. s.l.:s.n.

Nawy, E., 2008. *Construction Engineering Handbook*. 2ed.. FL, USA: Taylor & Francis group..

Picazo, A., Gálvez, J., Alberti, M. G., Enfedaque, A., 2018. Assessment of the shear behaviour of polyolefin fibre reinforced concrete and verification by means of digital image correlation. *Construction and Building Materials*, Volumen Volume 181, pp. 565-578.

Serna, P., 2007. Recientes ejemplos estructurales de aplicación de hormigón de fibras. *Monografía sobre aplicaciones estructurales de hormigones con fibras*, pp. 33-47.

Zollo, R., 1997. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development.. *Cement & Concrete Composites*, 19, pp. 107-122.