

Avances en el desarrollo de las primeras recomendaciones de diseño en España para el Hormigón de Muy Alto Rendimiento (HMAR)

Advances in the development of the first Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC) recommendations in Spain

Pedro SERNA ROS

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Valencia
Catedrático de Universidad
pserna@cst.upv.es

Juan Ángel LÓPEZ MARTÍNEZ

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Research & Development Concretes, S.L. (RDC)
Socio Fundador
jlopez@rdconcrete.com

Juan NAVARRO-GREGORI

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Universidad Politécnica de Valencia
Profesor Contratado Doctor
juanagre@cst.upv.es

RESUMEN

El HMAR ha demostrado ser un material prometedor para el desarrollo futuro de aplicaciones de arquitectura e ingeniería civil. Con el objetivo de promover el uso del HMAR y de conducir a la ingeniería española a la vanguardia mundial en el sector de la construcción, en noviembre de 2015 se constituyó el grupo de trabajo 1.6 de la Comisión 1 de ACHE con el fin de desarrollar las primeras recomendaciones españolas para el diseño de estructuras con HMAR. En este documento se presenta un resumen de los aspectos más relevantes desarrollados por el grupo de trabajo hasta el momento, relativos a su tipificación, caracterización a tracción y las ecuaciones constitutivas para el diseño.

ABSTRACT

UHPFRC has shown to be a promising material for the future development of architectural and civil engineering applications. With the aim to foster the use of UHPFRC in Spain and drive the Spanish engineering to the forefront of the construction sector at global level, the Committee nº1 of the Scientific-Technical Spanish Association of Concrete (ACHE) created in November 2015 the task group 1.6 focused on the development of the first UHPFRC design guidelines in Spain. This paper provides a summary of the major issues developed so far by the task force regarding its classification, tensile characterisation and constitutive design laws.

PALABRAS CLAVE: Recomendaciones, diseño, HMAR

KEYWORDS: Guidelines, design, UHPFRC

1. Introducción

El Hormigón de Muy Alto Rendimiento (HMAR) ha demostrado ser un material prometedor para el desarrollo de aplicaciones en arquitectura e ingeniería civil gracias a la labor de investigación y a las aplicaciones llevadas a cabo durante la última década. Sin embargo, todavía queda un largo camino para conseguir que este material sea considerado como una alternativa al hormigón convencional y al acero a la hora de preparar un proyecto. A lo largo de este camino es necesario dar respuesta a los cuatro grandes problemas que todavía limitan el uso del HMAR: (i) elevado coste de las materias primas; (ii) falta de experiencia de las ingenierías para encontrar sistemas específicos de construcción y diseños adaptados a las posibilidades del HMAR; (iii) necesidad de códigos de diseños específicos para el HMAR; (iv) dificultad a la hora de evaluar los beneficios económicos y ambientales a largo plazo de las estructuras de HMAR.

Con el objetivo de promover el uso del HMAR y de conducir a la ingeniería española a la vanguardia mundial en el sector de la construcción, en noviembre de 2015 se constituyó el grupo de trabajo 1.6 de la Comisión 1 de ACHE con el objetivo de desarrollar las primeras recomendaciones para el diseño de estructuras mediante HMAR. En este documento se presenta un resumen de los aspectos más relevantes desarrollados hasta el momento por el grupo, destacando los detalles específicos aplicables para el empleo de estos hormigones y que se encuentran basados en [1-3].

En primer lugar se introduce una definición cualitativa de lo que significa HMAR y los requisitos mínimos de durabilidad que deben cumplirse para que un hormigón pueda ser incluido dentro del grupo de los HMAR. A continuación se presenta la propuesta de tipificación realizada para permitir un diseño sencillo de las estructuras proyectadas con HMAR, así como el ensayo de caracterización propuesto. Finalmente, se presentan las ecuaciones constitutivas de diseño para los estados límite de servicio y últimos.

2. Definición y composición del HMAR

De acuerdo con [1-3], se puede proponer para el Hormigón de Muy Alto Rendimiento (HMAR), denominado también UHPFRC de acuerdo a su acrónimo internacional, la siguiente definición:

“El HMAR es un material de base cementicia que combina los tres grandes avances tecnológicos en hormigón: (i) una resistencia a compresión superior a 120 MPa garantizando un fallo dúctil en compresión; (ii) comportamiento dúctil a tracción gracias al uso de fibras que puede aportar un comportamiento pseudo-plástico a tracción acompañado de multi-micro fisuración dependiendo de la cantidad, esbeltez y distribución de fibras; (iii) una especial selección de partículas finas y ultra-finas que proporcionan un elevado empaquetamiento, alta durabilidad y cierto grado de autocompactabilidad”.

Las fibras son un elemento indispensable para la elaboración del HMAR. Cualquier tipología de las fibras empleadas para hormigones es válida para la elaboración del HMAR siempre que con su uso se consiga aportar las propiedades mecánicas de ductilidad a compresión y resistencia a tracción requeridas por el proyecto. La gran mayoría de aplicaciones estructurales en HMAR emplean fibra metálica en porcentajes en volumen que oscilan entre el 1% y el 3%. Las fibras metálicas más comunes son las fibras lisas y rectas en longitudes comprendidas entre 6 y 20 mm con una esbeltez superior a 65 (para mejorar la adherencia entre la fibra y la matriz) y por debajo de 80 (para evitar la formación de bolas de fibra). Aunque su uso es menos frecuente, existen

aplicaciones con mayores requerimientos de ductilidad en las que se han empleado fibras de mayor longitud con anclaje por gancho en sus extremos. También es posible una combinación de ambos tipos de fibras para conseguir un efecto sinérgico.

Las materias primas más comunes para la elaboración del HMAR son: cemento Portland, harina de cuarzo, humo de sílice, arena silícea, aditivo superplastificante y agua. Estos materiales, junto con las fibras más comunes se muestran en la figura 1. Dependiendo de los materiales predominantes en cada región, también se han utilizado para su elaboración materiales tales como las escorias de alto horno, cenizas volantes, harina de vidrio, áridos de elevada dureza, etc. Al igual que ocurre con el resto de hormigones, no existe una dosificación estándar para la fabricación del HMAR. Sin embargo, para su desarrollo se pueden seguir ciertos criterios generales.

El HMAR se fabrica utilizando una elevada cantidad de cemento, normalmente mayor de 700 kg/m³, y una cantidad de finos totales superior a 1000 kg/m³. La cantidad de harina de sílice y de humo de sílice se encuentra entre un 15% y un 25% del peso de cemento. El material restante lo compone la arena de sílice con un tamaño máximo inferior a 2 mm. Para alcanzar una resistencia a compresión de al menos 120 MPa y garantizar una elevada durabilidad del HMAR se necesitan relaciones agua/cemento inferiores a 0.25.



Figura 1. Materiales comunes en España para la fabricación de un HMAR [4]

3. Modelo de comportamiento del HMAR a tracción

La propiedad diferenciadora a tracción del HMAR es su comportamiento pseudo-plástico a tracción, que puede modelizarse según se indica en la figura 2. Este comportamiento queda definido por dos leyes bilineales. Por un lado, se define una ley tensión-deformación hasta carga máxima definida por cuatro parámetros: (i) módulo elástico (E); (ii) resistencia a tracción de la matriz ($f_{c,t}$); y (iii) coeficiente de endurecimiento (λ) y (iv) la deformación máxima al pico en %

($\varepsilon_{t,u}$). El módulo elástico a tracción se puede considerar igual al de compresión y se puede estimar a partir de la resistencia característica a compresión en probeta cilíndrica de acuerdo a la formulación de la EHE-08. Mientras la tensión pico a tracción no se supere, el hormigón presenta un alargamiento progresivo sin fisuración aparente (sólo microfisuración distribuida) A partir de este momento una macro fisura se localiza en la sección más débil y el hormigón presenta una respuesta de ablandamiento que se puede definir por una ley bilineal de ablandamiento tensión-abertura de fisura que queda definida por dos parámetros adicionales: (ii) abertura de fisura (w_0); y (iii) longitud de fibra (L_f).

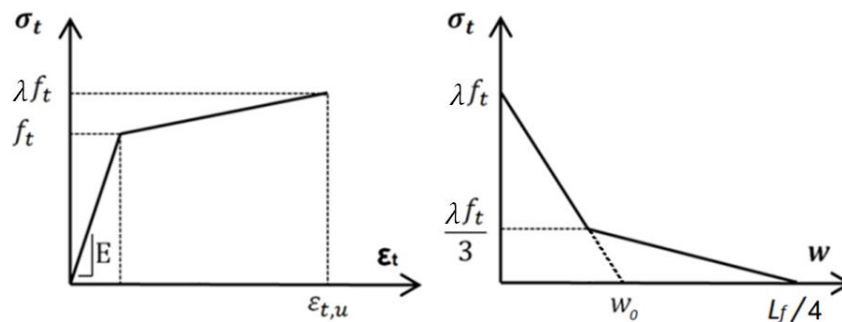


Figura 2. Ecuación constitutiva simplificada a tracción del HMAR

4. Exigencias mínimas al comportamiento del HMAR

Un HMAR, en sentido estricto, se caracteriza por la rama de endurecimiento en la primera fase del comportamiento. Para poder considerar esta rama de endurecimiento en el cálculo se exige que se cumplan simultáneamente dos condiciones: (i) el coeficiente de endurecimiento medio (λ_m) es superior o igual a 0.9 y (ii) la deformación característica al pico es superior o igual al 2‰. El HMAR que se cumpla estos requisitos podrá ser tipificado como "SH" (strain hardening).

Para cubrir la frontera con los hormigones de fibras tradicionales que puedan presentar muy altas resistencias se propone caracterizar un HMAR con ablandamiento. Se definen como aquellos HMAR que no cumplen los requisitos mínimos para ser considerados "SH" y se tipifican como de clase SS (strain softening). Su primera fase no será considerada en los cálculos y, al igual que el hormigón con fibras convencional, el ablandamiento queda definido únicamente por dos parámetros.

En cualquier caso, tanto en SS como en SH, para que estas recomendaciones puedan ser aplicadas es necesario que el HMAR cumpla con los siguientes requisitos de resistencia y ductilidad (tabla 3):

- Comportamiento con endurecimiento por deflexión a flexotracción (ver apartado 4).
- Resistencia característica a tracción superior ($f_{t,k}$) a 5 MPa
- Abertura de fisura $w_{0,k}$ superior a 0.5 mm

Dado que es frecuente que la utilización de estos hormigones se justifique por sus ventajas de durabilidad, es lógico plantear unos requisitos mínimos, que se han fijado aceptando los límites propuestos en [2]. Estos son:

- Porosidad accesible al agua a 90 días inferior al 9% según UNE 83980:2014
- Coeficiente de difusión acelerado de cloruros a 90 días inferior a 0.5 10-12 m²/s según UNE 83987:2014

- Permeabilidad al oxígeno a 90 días inferior a $9 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ según UNE 83981:2008

Clase de resistencia a tracción	SS	SH
$f_{t,k}$ (MPa)	≥ 5	
$w_{0,k}$ (mm)	≥ 0.5	
λ_m	-	≥ 0.9
$\varepsilon_{t,u,k}$ (‰)	-	≥ 2

Tabla 3. Clases de resistencia a compresión

De acuerdo con [5] se ha elaborado la tabla 1 en la que se comparan los valores más frecuentes de estas propiedades para diferentes hormigones.

Propiedad	Resistencia a compresión (MPa)			
	25-50	50-100	100-130	>130
Porosidad accesible al agua (%)	14-20	10-13	6-9	-1.5-5
Coefficiente de difusión de cloruros acelerado a 90 días (m^2/s)	$>10^{-11}$	10^{-12} - 10^{-11}	10^{-13} - 10^{-12}	10^{-13}
Permeabilidad al oxígeno a 90 días (m^2)	10-16	10-17	10-18	<10-19

Tabla 1. Comparación de las propiedades de durabilidad para diferentes hormigones

5. Determinación del comportamiento a tracción de un HMAR

La realización de los parámetros que definen el comportamiento a tracción por medio de un ensayo a tracción en hormigones plantea siempre dificultades difíciles de solventar en laboratorios comerciales, por ello el comportamiento a tracción suele evaluarse a través de ensayos de flexión. Para los hormigones con fibras convencionales se emplea el método desarrollado en la norma (EN 14651). Pero este método no permite caracterizar la fase de endurecimiento en HMAR. Para este objetivo se propone un ensayo de flexotracción a cuatro puntos sobre probeta sin entalla, con cargas a tercios de la luz. Su interpretación suele apoyarse en un análisis inverso [5], de difícil viabilidad a nivel práctico. En el Grupo de trabajo se está planteando la adopción del criterio de análisis desarrollado en [1]. Tanto el ensayo como la metodología de obtención de los parámetros a tracción se encuentran en estos momentos en fase de evaluación por AENOR para convertirse próximamente en una norma española.

Las probetas deben ser prismas de sección cuadrada conformes a la Norma Europea EN 12390-1. La dimensión mínima depende de la longitud máxima de las fibras:

PROBETA TIPO A: Prismática $100 \times 100 \times 550 \text{ mm}$ si $L_f \leq 20 \text{ mm}$

PROBETA TIPO B: Prismática $150 \times 150 \times 600 \text{ mm}$ si $20 \leq L_f \leq 60 \text{ mm}$

La luz de ensayo (L) será de 450 mm independientemente del tipo de la probeta utilizada. Una mayor relación luz/canto mejora la precisión del ensayo pero para el tipo B llevaría a probetas excesivamente pesadas. La longitud de probeta será un canto mayor que la luz de ensayo.

La configuración del ensayo se representa en la figura 3. Durante el ensayo se determina la flecha en el centro por medio de un transductor de desplazamiento a cada lado de la probeta sobre un bastidor rígido que se fija a la probeta a media altura sobre los apoyos.

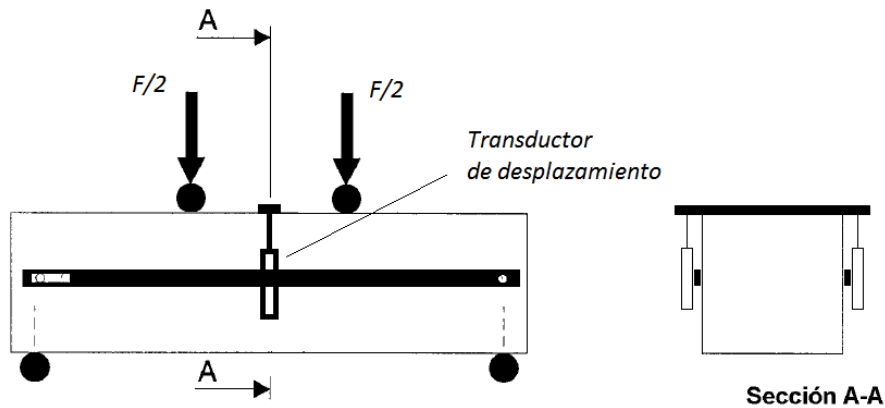


Figura 3. Configuración sugerida para la determinación de la felcha

Los ensayos en los cuales ambos extremos de la fisura arrancan claramente por fuera del tercio central deben rechazarse.

Tras el ensayo, debe determinarse el valor medio de la distancia entre la parte superior de la fisura y el centro de vano medido a cada uno de los lados de la probeta (d) (figura 4).

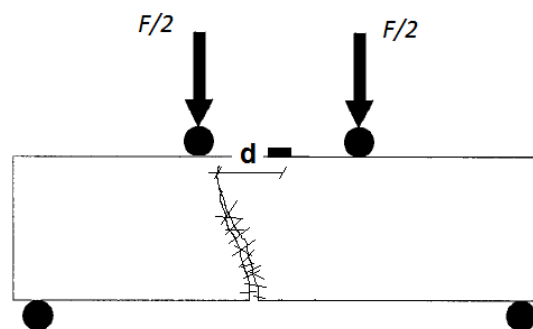


Figura 4. Medida del parámetro d

Tras la realización del ensayo se obtiene una gráfica $\sigma - \delta$ como la de la figura 5. Para ello es necesario transformar la carga obtenida en tensión lineal equivalente, asumiendo una distribución de tensiones lineal en la sección. Sobre esta gráfica es necesario identificar 4 puntos de referencia. Los puntos 1 y 2 quedan definidos por la intersección de las rectas S_{75} y S_{40} con la curva, respectivamente. La pendiente de las rectas S_{75} y S_{40} es el 75% y el 40% de la pendiente inicial de la curva, respectivamente. El punto 3 se define como el punto en la rama ascendente con una tensión igual al 97% de la máxima. El punto 4 se define como el punto en la rama descendente con una tensión igual al 80% de la tensión que define el punto 3. El módulo de elasticidad se puede obtener en función del canto de la probeta (h) y de la pendiente inicial (m) obtenida en la curva $\sigma - \delta$ y que define la recta S_0 de acuerdo con la formulación de la tabla 4 y la figura 5.

Una vez obtenidos estos puntos es posible determinar los parámetros que definen la ley constitutiva a tracción aplicando la formulación de la tabla 4 que se justifican en [1]. Es importante tener en cuenta que este método sólo es de aplicación en aquellos casos en los que el punto 2 está por debajo del punto 3. Esto ocurre en los hormigones con un contenido en fibras y características por debajo de lo necesario para alcanzar las exigencias mínimas para ser considerado como HMAR.

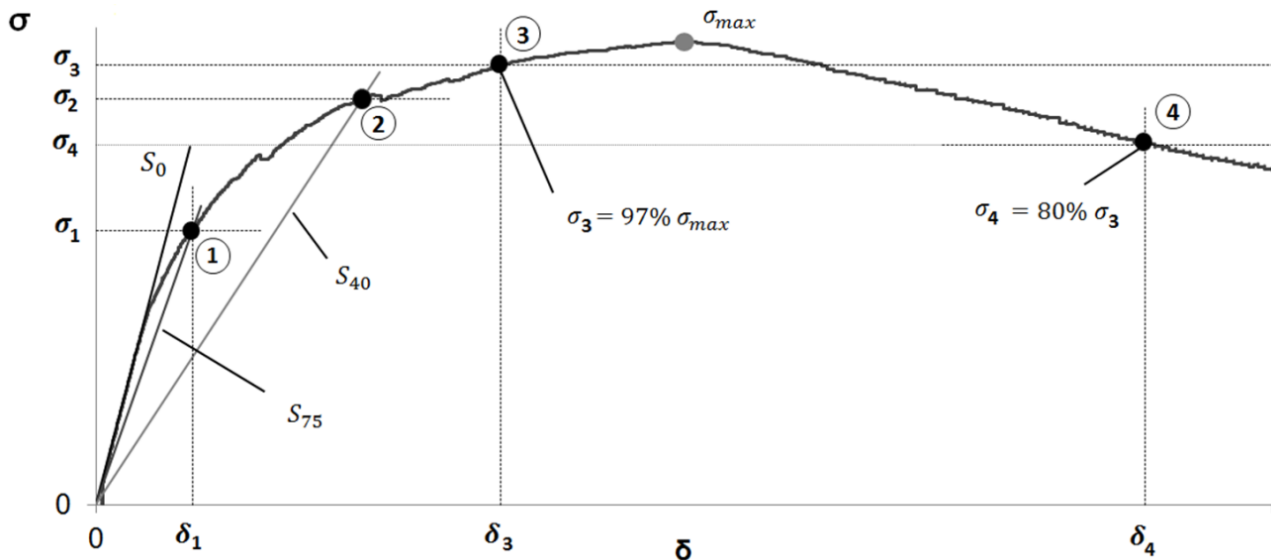


Figura 5. Resultado experimental tipo y proceso de obtención de los puntos clave

	$h = 100 \text{ mm}$ $L = 450 \text{ mm}$	$h = 150 \text{ mm}$ $L = 450 \text{ mm}$	Parámetros
E	$2.40 h m$	$4.79 h m$	
f_t	$\frac{\sigma_1}{1.63} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^{0.19}$	$\frac{\sigma_1}{1.59} \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_2}\right)^{0.21}$	
$\varepsilon_{t,u}$	$\frac{f_t}{E} \left(7.65 \frac{\delta_3}{\delta_1} - 10.53\right)$	$\frac{f_t}{E} \left(6.65 \frac{\delta_3}{\delta_1} - 9.40\right)$	
λ	$\alpha^{-0.18} \left(2.46 \frac{\sigma_3}{\sigma_1} - 1.76\right)$	$\alpha^{-0.17} \left(2.24 \frac{\sigma_3}{\sigma_1} - 1.55\right)$	$\alpha = \varepsilon_{t,u} E / f_t$
$\varepsilon_{t,d}$	$\lambda^{-0.37} \alpha^{0.88} \left(3.00 \frac{\delta_4^*}{\delta_3} - 1.80\right) \frac{f_t}{E}$	$\lambda^{-0.38} \alpha^{0.89} \left(2.82 \frac{\delta_4^*}{\delta_3} - 1.68\right) \frac{f_t}{E}$	$\delta_4^* = \delta_4 \left(1 + \frac{0.6}{L} d\right)$
w_0	$\left(\varepsilon_{t,d} - \varepsilon_{t,u} + \frac{10\gamma f_t}{3E}\right) \frac{3h}{2}$	$\left(\varepsilon_{t,d} - \varepsilon_{t,u} + \frac{10\gamma f_t}{3E}\right) \frac{9h}{4}$	

Tabla 4. Formulación para la determinación de los parámetros constitutivos a tracción

6. Tipificación del HMAR

Tratando de seguir los criterios de clasificación y tipificación de hormigones convencionales y hormigones con fibras, se ha propuesto el siguiente criterio de tipificación para el HMAR:

$$\text{HMAR} - f_{c,k-cil} / \text{CA} / \text{LF} / \text{CC}$$

$$\text{SX} - f_{c,t,k} / \lambda_k / \varepsilon_{t,u,k} / w_{0,k}$$

siendo,

$f_{c,k-cyl}$: resistencia característica a compresión

CA: clase ambiental de acuerdo a las normativas vigentes (EHE 08)

LF: longitud de la fibra mayor empleada

CC: clase de consistencia de acuerdo a la EHE-08 para HAC (E1, E2 o E3)

SX: clase de comportamiento a tracción: ablandamiento (SS) o endurecimiento (SH)

$f_{c,t,k}$: resistencia característica a la tracción de la matriz en *MPa*.

λ_k : coeficiente de endurecimiento característico.

$\varepsilon_{t,u,k}$: deformación característica máxima al pico en ‰

$w_{o,k}$: abertura de fisura característica en *mm*

En HMAR que presenten ablandamiento (SS) su comportamiento a tracción quedaría definido únicamente por la siguiente nomenclatura:

$$SS - f_{c,t,k} / w_{o,k}$$

La resistencia característica a compresión del HMAR queda tipificada en función de la resistencia característica obtenida en probeta cilíndrica (EN 12390) con el fin de mantener el mismo criterio de tipificación que para hormigones convencionales. Sin embargo, es muy frecuente la determinación de la resistencia a compresión del HMAR en probetas cúbicas de 100 mm de lado. Los diferentes tipos de HMAR en función de su resistencia a compresión y la equivalencia entre los resultados en probetas cilíndricas y cúbicas se muestran en la tabla 2. Para este tipo de hormigones, y siempre que se asegure un coeficiente de variación máximo en producción del 10%, se puede considerar a efectos de cálculo que la resistencia media del HMAR es un 20% superior a la resistencia característica.

Clase de resistencia a compresión	Resistencia característica mínima en cilindros $\Phi 150/h300$	Resistencia característica mínima en cubos $L=100mm$
	f_{ck-cil} (MPa)	$f_{ck-cubo}$ (MPa)
HMAR – 120	120	135
HMAR – 135	135	150
HMAR – 150	150	165
HMAR – 175	175	190
HMAR – 200	200	215
HMAR – 225	225	240

Tabla 2. Clases de resistencia a compresión

Para la tipificación de los parámetros que definen el comportamiento en tracción se proponen los siguientes valores:

$$f_{c,t,k}(MPa) \rightarrow [6, 7, 8, 9, 10, 12, 14]$$

$$\lambda_k \rightarrow [0.9^{(*)}, 1, 1.2, 1.4]$$

$$\varepsilon_{t,u,k}(\text{‰}) \rightarrow [2, 4, 6, 8, 10]$$

$$w_{o,k}(mm) \rightarrow [0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4]$$

(*) En el caso del coeficiente de endurecimiento (λ), para pertenecer a la clase 0.9 basta con que el valor medio obtenido de acuerdo al ensayo de caracterización sea igual o superior a 0.9 en lugar del valor característico.

A continuación se muestra un ejemplo de cada tipo de comportamiento a tracción para un HMAR común:

SH - 8 / 0.9 / 2 / 1

SS - 5 / 1

7. Leyes de cálculo

En compresión se podrá asumir una ley elástica lineal hasta la resistencia de cálculo. El valor de la resistencia a compresión de cálculo (f_{cd}) se determinará de acuerdo con la ecuación 1, siendo α_{cc} igual a 0.85 y γ_c igual a 1.5. Sobrepasado este valor podrá asumirse un comportamiento plástico hasta una deformación del 3‰. En servicio se comprobará que la tensión máxima de compresión no sobrepasa el 60% de la tensión característica.

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck,cil}}{\gamma_c} \quad (1)$$

Las leyes de cálculo a tracción propuestas para el HMAR en función de los parámetros en los que se ha tipificado se muestran en las figuras 6 y 7 para el cálculo en Estado Límite de Servicio (ELS) y Estado Límite Último (ULS), respectivamente. En estas figuras aparecen tres nuevos parámetros que no se incluyen en la caracterización del material: (i) longitud característica de la estructura (l_c); (ii) coeficiente de orientación de fibras (K); (iii) deformación pico de diseño en servicio $\varepsilon_{t,u,s}$.

La longitud característica de la estructura permite transformar la abertura de fisura en deformación, para así obtener una ley tensión-deformación que pueda ser utilizada para la comprobación seccional. En ELS se puede tomar igual a la separación media entre fisuras, mientras que en ELU se puede utilizar como aproximación una longitud característica de la estructura igual al 66% del canto de la pieza [5].

El coeficiente de orientación de fibras tiene en cuenta que la distribución de fibras en la estructura puede ser diferente a la distribución de fibras en la probeta estándar. Se define un coeficiente de orientación global de fibras de 1.25 válido para regiones B. Para regiones D se aplica un coeficiente local de orientación de fibras igual a 1.75. Futuras investigaciones deben ofrecer una mejor aproximación de estos coeficientes que tenga en cuenta la tipología de fibra empleada, su relación geométrica con los elementos de la estructura, el sistema de puesta en obra y método de fabricación con el fin de evitar los sobrecostes actuales de tener que determinar estos valores mediante prototipos o elementos representativos.

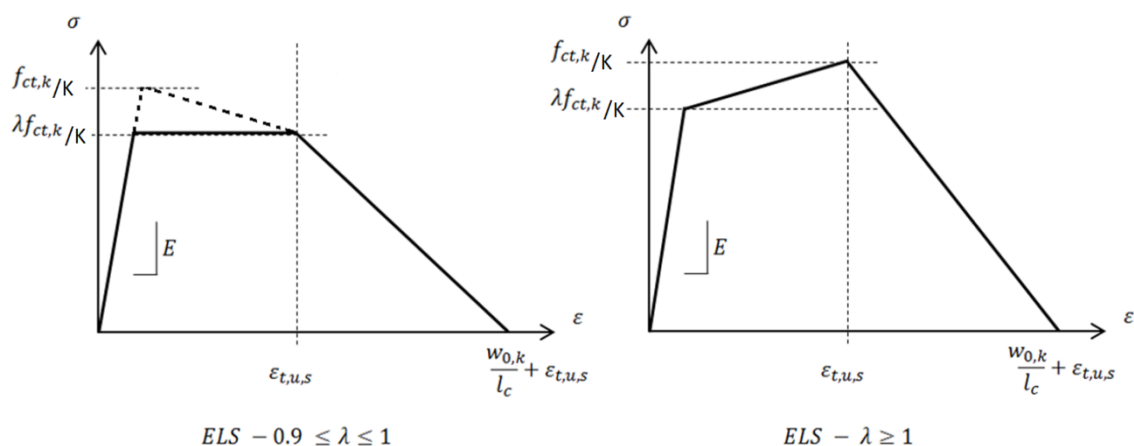


Figura 6. Ley para el cálculo en ELS con HMAR

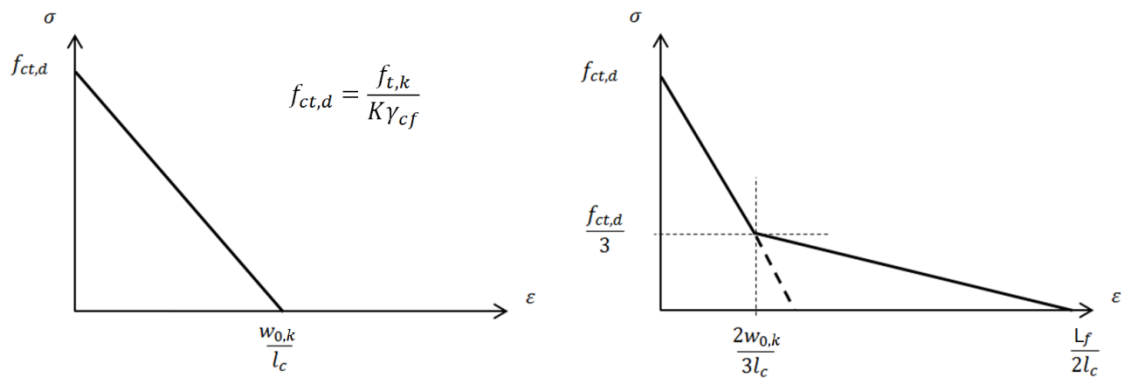


Figura 7. Ley simplificada para el cálculo en ELU con HMAR

Dado que el valor de la deformación pico en ELS tiene una componente estructural, no se puede utilizar directamente el valor $\varepsilon_{t,u,k}$ por el que el HMAR queda tipificado. A falta nuevos estudios podrán asumirse en el caso de estructuras armadas los valores de deformación de la ecuación 2. Sólo en el caso de estructuras no armadas, podrá emplearse el valor $\varepsilon_{t,u,k}$ cuyo valor no podrá sobrepasarse en ELU.

$$\varepsilon_{t,u,s} = \begin{cases} 0.0015 & \text{si } \varepsilon_{t,u,k} \leq 0.004 \\ 0.002 & \text{si } \varepsilon_{t,u,k} > 0.004 \end{cases} \quad (2)$$

Agradecimientos

El presente trabajo ha sido desarrollado por los miembros del grupo de trabajo 1.6 de la Comisión 1 de ACHE, a los que se agradece su colaboración. Además, el desarrollo de las recomendaciones se encuadran dentro del proyecto coordinado del Plan Nacional “Besho” y proyecto “FISNE” con referencia BIA2012-35776, concedidos ambos por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, agradeciendo su apoyo y financiación necesarios para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] López, J.A., Characterisation of the tensile behaviour of UHPFRC by means of unnotched four-point bending tests. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València. Febrero, 2017.
- [2] AFNOR, NF P18-710, Complément national à l'Eurocode 2 – Calcul des structures en béton: règles spécifiques pour les bétons fibrés à ultra-hautes performances (BFUP), 2016.
- [3] SIA 2052:2014-12, Béton Fibré Ultra-Performant (BFUP): Matériaus, dimensionnement et exécution. Draft. 2014.
- [4] Camacho, E., Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València. Diciembre, 2013.
- [5] AFGC. Recommendations for the use of Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete. June, 2013