

Modelado de tirantes armados de hormigón de muy alto rendimiento

Modelling of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete Ties

Eduardo J. Mezquida-Alcaraz^a, Juan Navarro-Gregori^b y Pedro Serna^c

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València (ICITECH-UPV). edmezal@alumni.upv.es

^b Prof. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València (ICITECH-UPV). juanagre@cst.upv.es

^c Cat. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Universitat Politècnica de València (ICITECH-UPV). pserna@cst.upv.es

RESUMEN

En esta investigación se desarrolla un modelo 3D no lineal de elementos finitos (3D-NLFEM-multicrack) de tirantes armados de hormigón de muy alto rendimiento (HMAR) con el objetivo de aprovechar las grandes ventajas de este material en el diseño de elementos estructurales. Para la validación del modelo se utilizan los resultados de una campaña experimental con tirantes con diferentes ratios de armado y con HMAR con un contenido en fibras de acero de 160 kg/m³. Tras el análisis, se obtiene que el modelo es capaz de simular con exactitud la respuesta mecánica del ensayo de tracción directa y de realizar una buena predicción del rango de deformaciones debidas a la retracción del HMAR.

ABSTRACT

In this study a nonlinear finite element model (3D-NLFEM-multicrack) was developed to simulate the mechanical response of reinforced Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) tensile elements to take advantage of its enhanced properties focused on critical design aspects. An experimental program that involved tensile test specimens with varying reinforcement ratios was followed using UHPFRC with 160 kg/m³ steel fiber content. A comparative analysis between the results of the tensile tests run in the experimental program and the model-simulated responses gave reliable predictions of the shrinkage strain range and an accurate reinforced UHPFRC tensile bar mechanical response.

PALABRAS CLAVE: HMAR, tracción, tirantes armados, modelo numérico, retracción, fibras de acero.

KEYWORDS: UHPFRC, reinforced tensile elements, numerical modeling, shrinkage, steel fibers.

1. Introducción y objetivos

El hormigón de muy alto rendimiento (HMAR) o más conocido como Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC), podría ser considerado como una evolución tecnológica del hormigón con fibras (FRC) que, debido a su particular dosificación, es capaz de desarrollar grandes características mecánicas: resistencia a compresión superior a los 150 MPa, resistencia a

tracción superior a los 7 MPa y resistencia a flexotracción entre 15 y 40 MPa, además de ser un tipo de hormigón autocompactable con ductilidad y gran durabilidad. Estas características hacen del HMAR, a priori, un material muy adecuado para el diseño de estructuras esbeltas y ligeras que puedan estar sometidas a ambientes agresivos.

No obstante, debido al elevado contenido de cemento utilizado en su dosificación (relación agua/cemento = 0.2), el HMAR es propenso a desarrollar altos niveles de retracción a edades tempranas. Es por ello de gran importancia tener en cuenta estos altos niveles de retracción debido a su potencial capacidad de generar tensiones internas de tracción en la matriz de hormigón donde entra en contacto con las barras de armado o en determinadas condiciones de contorno. De la literatura al respecto [1–4], parece coherente asumir un rango de deformación total por retracción entre 0.60 y 0.90 mm/m para HMAR sin tratamiento de calor y una relación a/c ≤ 0.25 .

Con el objetivo de arrojar cierta luz para acercar el desarrollo del HMAR a la realidad estructural desde el punto de vista del diseño y del análisis, en el presente trabajo se lleva a cabo el desarrollo de un completo modelo numérico para simular el comportamiento de elementos estructurales de HMAR armado sometidos a tracción pura (tirantes). Con ello se pretende analizar con todo detalle el comportamiento a tracción que es capaz de desarrollar este tipo de hormigón mejorado y la influencia que tiene en su interacción con las armaduras de refuerzo.

Así pues, teniendo en mente este objetivo, se plantea el estudio desde el punto de vista de la influencia de la retracción en el estado tensional interno del tirante previa a su puesta en carga y la posterior respuesta mecánica del tirante cuando se ensaya bajo carga a través del efecto de tension-stiffening. Con este propósito, en el presente trabajo, se desarrolla un modelo no lineal de elementos finitos (NLFEM) capaz de simular adecuadamente la retracción y, considerando su influencia, simular con precisión la respuesta mecánica de elementos estructurales sometidos a tracción (tirantes) de HMAR armado.

Para demostrar la validez de los resultados que ofrece el NLFEM, se lleva a cabo el modelado de una campaña experimental de tirantes armados con diferentes cuantías de

armado y con HMAR con un contenido en fibras de 160 kg/m³. Con ello, se comparan los resultados derivados de la simulación numérica con los procedentes de la campaña experimental, se discute la fiabilidad del rango de deformaciones por retracción que es capaz de predecir el modelo y su influencia en la posterior respuesta mecánica de los tirantes de HMAR. Finalmente se resaltan las conclusiones más relevantes de este estudio y sus implicaciones en el diseño de elementos estructurales de HMAR armados.

2. Programa experimental

Para considerar la respuesta mecánica real a tracción de los tirantes de HMAR y compararla con las simulaciones del modelo desarrollado en este trabajo, se han adoptado los resultados procedentes de una campaña experimental llevada a cabo en [5]. La campaña adoptada se compone de los tirantes de HMAR armados y las probetas de acompañamiento para la caracterización del hormigón.

2.1 Tirantes de HMAR armados

La geometría de los tirantes es prismática de 1000 mm de longitud con una sección cuadrada. Dichos tirantes están armados con una barra localizada en el centro de la sección de 1450 mm de longitud. Además, a cada extremo de la barra hay soldadas dos barras complementarias de 475 mm de longitud y del mismo diámetro que la barra central para evitar el efecto de la concentración de tensiones en los extremos debido al utillaje del ensayo. Como se observa en la Figura 1(a) la disposición del armado habilita los 500 mm centrales con una sola barra para ser analizados. En la Figura 1(b) se muestra la posición de los transductores de desplazamiento situados en las cuatro caras del tirante utilizados para el ensayo. En la Tabla 1 se resume las dimensiones de la sección, el diámetro de las

barras y el número de tirantes adoptados del programa experimental [5].

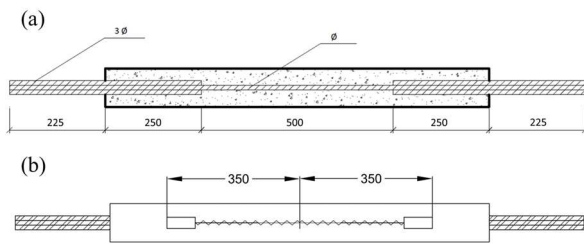


Figura 1. (a) armado y (b) transductores de desplazamiento (uds. en mm).

Tabla 1. Tirantes del programa experimental

Sección (mm)	ϕ (mm) barra	Nº de tirantes
60x60	10	5
	12	3
80x80	10	3
	12	3
	10	1
100x100	12	3
	16	3

En la dosificación del HMAR se han utilizado 160 kg/m^3 de fibras de acero lisas 13/0.20. Las barras de armado son B500SD. Tanto los tirantes como las probetas de acompañamiento para su caracterización fueron ensayadas a los 30 días de su fabricación.

Para llevar a cabo el ensayo a tracción se ha posicionado el tirante en un bastidor que fija las barras desde un extremo (extremo pasivo) y desde el otro (extremo activo) se transmite la tensión a las barras a través de un gato hidráulico. De este modo, la tensión se transmite de la barra al hormigón por adherencia.

2.2 Caracterización del material

Para la caracterización mecánica del HMAR usado en cada mezcla, se han fabricado 24 probetas cúbicas de 100mm para la caracterización del comportamiento a compresión y 9 probetas de 500x100x100mm ensayadas a flexo-tracción a 4 puntos sin entalla

(4PBT) para la obtención del comportamiento a tracción.

Para obtener el comportamiento constitutivo a tracción del HMAR a partir del 4PBT es necesario realizar un análisis inverso para derivar, de la curva de flexión obtenida del ensayo, la respuesta a tracción. Este análisis inverso se ha llevado a cabo a través de un método directo simplificado propio [6]. Este método fue desarrollado y validado tanto experimental como numéricamente, por el grupo de investigación, para HMAR que exhibe comportamiento constitutivo a tracción con endurecimiento por deformación o strain-hardening (SH-UHPFRC) en [7–10] y posteriormente calibrado y ampliado para ser utilizado para HMAR que exhibe comportamiento constitutivo a tracción con ablandamiento por deformación o strain-softening (SS-UHPFRC) en [11,12]. Toda esta investigación da como resultado un completo y eficaz método para la obtención de un comportamiento constitutivo material optimizado para el HMAR para el modelado y diseño (ver Figura 2), de un modo directo, sencillo y preciso [6,11].

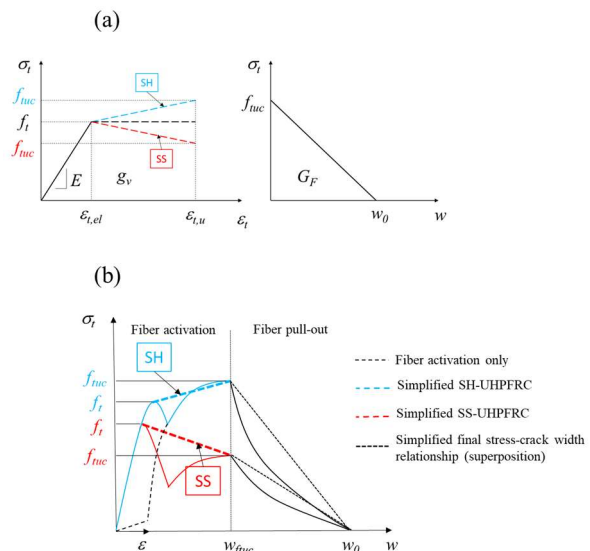


Figura 2. (a) Comportamiento constitutivo optimizado del HMAR para modelado y diseño que simplifica el (b) comportamiento real

En la Tabla 2 se muestran los parámetros característicos medios (del 50%) que definen el comportamiento a tracción con la aplicación del

método directo simplificado (ver Figura 2(a)) a partir del ensayo 4PBT, y la resistencia a compresión a partir de las probetas cúbicas, para los tirantes armados utilizados para el modelo.

Tabla 2. Caracterización mecánica del HMAR de los tirantes

Parámetro	Valor
f_t (MPa)	9.62
f_{tuc} (MPa)	8.44
ε_{tu} (‰)	3.31
E (MPa)	50700
w_0 (mm)	3.24
f_c (MPa)	153.99

El acero B500SD que se ha utilizado para las barras de armado se ha caracterizado a través de un comportamiento bilineal tensión-deformación con endurecimiento por deformación considerando un límite elástico (f_{st}) de 500 MPa, una tensión última (f_{stu}) de 550 MPa, una deformación elástica ($\varepsilon_{st,el}$) de 0.0025, una deformación última ($\varepsilon_{st,u}$) de 0.05 y un módulo elástico (E_s) de 200000 MPa.

3. Modelo numérico

Para el modelado de los tirantes armados de HMAR se ha llevado a cabo el desarrollo de un modelo 3D no lineal de elementos finitos (NLFEM) con el software específico DIANA FEA [13]. Para definir el 3D NLFEM se ha tomado como base el modelo desarrollado por los autores en [6,9,11,14] adaptándolo a las características de los tirantes armados.

El comportamiento constitutivo del HMAR se ha definido a través de la aproximación discreta según la cual se utiliza un modelo de fisuración discreto como interfaz. Para este caso, se han tenido en cuenta elementos interfaz entre todos los elementos sólidos situados en la misma vertical dando lugar al denominado *3D-NLFEM-multicrack*, tal y como se muestra en la Figura 3. El sólido 3D se

ha definido con la aproximación difusa del comportamiento constitutivo de HMAR basado en el “fixed total strain crack model” a través de una curva constitutiva tensión-abertura de fisura según the Fédération Internationale du Béton/International Federation for Structural Concrete (fib) working groups. Los elementos interfaz discretos, que simulan el trayecto de las fisuras, se han definido a través de un comportamiento constitutivo mediante una función multi-linear que relaciona los desplazamientos relativos normales al elemento interfaz con las tensiones de tracción normales al mismo. De este modo, se establece una especie de “elemento finito compuesto” en el que el cuerpo del elemento está formado por un sólido 3D limitado en sus laterales por dos elementos interfaz en cada lado siendo capaz, de este modo, de representar el comportamiento constitutivo híbrido σ - ε/w característico del HMAR (ver Figura 2).

El armado ha sido modelado usando el modelo elasto-plástico con endurecimiento por deformación de Von Mises con una función de adherencia entre el armado y la matriz de HMAR definida según el modelo de Dorr [15].

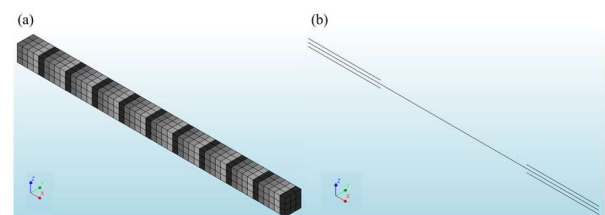


Figura 3. 3D-NLFEM-multicrack: mallado para (a) HMAR y (b) armadura

Los parámetros que definen el comportamiento constitutivo del HMAR de los tirantes obtenidos a partir de la caracterización mecánica se han implementado en el 3D-NLFEM-multicrack. El efecto de las fibras se considera ya implícito con la obtención de dichos parámetros, por lo que se asume la misma distribución y orientación de fibras que en las probetas de flexotracción de acompañamiento.

La retracción del HMAR y sus consecuencias se han implementado en el

modelo a través de una función material adaptada a partir de la expresión del EN 1992-1-1 Eurocode 2 [16] dentro del “fixed total strain crack model”. Para ello, la deformación total por retracción del HMAR ($\epsilon_{csUHPRC}$) se obtiene a partir de la deformación por retracción del Eurocode 2 (ϵ_{cs}) para el hormigón estándar incrementada con diferentes porcentajes (sh_{inc}), tal y como muestra la expresión (1). El sh_{inc} es un parámetro mediante el cual se tiene en cuenta la influencia de la retracción del HMAR, obtenido de forma numérica a través de un estudio paramétrico de sensibilidad llevado a cabo en [11]. Es importante destacar que el efecto de la retracción se ha modelado siguiendo la misma idea que en [3], esto es, sin tener en cuenta la posible relajación de las tensiones en el HMAR como consecuencia de la fluencia. Así pues, se ha considerado de forma conservadora un valor de retracción libre para la retracción post-fisura:

$$\epsilon_{csUHPRC} = \epsilon_{cs} \cdot \left(1 + \frac{sh_{inc}}{100}\right) \quad (1)$$

Para la parte continua del NLFEM se han utilizado elementos sólidos 3D cuadráticos isoparamétricos de 20 mm (ver Figura 3 (a)). Para los elementos interfaz discretos que modelan el comportamiento macro-fisurado se han utilizado elementos interfaz 3D cuadráticos planos, situados entre los elementos sólidos. El armado se ha modelado de forma discreta a través de elementos tipo barra con comportamiento de adherencia (ver Figura 3(b)).

Después de su fabricación, los tirantes se almacenaron durante 30 días antes de su ensayo. Para definir el análisis es importante tener en cuenta que, durante estos 30 días, no se llevó a cabo ninguna acción mecánica, por lo que el efecto de retracción fue el único que tuvo lugar desde el hormigonado. Este efecto conduce a una evolución de las tensiones internas debido a la presencia de las armaduras que impiden el libre acortamiento del hormigón en sus cercanías. De este modo, el efecto de la retracción genera

tensiones de tracción en el HMAR que rodea la posición de las armaduras y, consecuentemente, tensiones de compresión en dichas armaduras.

Este estado tensional previo debido a la retracción durante el tiempo de almacenamiento de los tirantes debe ser considerado como un estado tensional interno inicial en el ensayo de tracción mecánico del tirante. De este modo, se ha definido en el NLFEM un análisis en dos fases: una primera fase denominada *fase de retracción*, donde se simula el efecto de la retracción en el período de almacenamiento del tirante, y una segunda fase denominada *fase de ensayo*, donde se simula el ensayo de tracción mecánica de los tirantes teniendo en cuenta el estado tensional interno inicial del tirante procedente de la fase de retracción previa.

Así pues, el análisis para evaluar el estado tensional interno en la fase de retracción se ha definido como un análisis no-lineal considerando el efecto de la retracción a través de la función material anteriormente descrita siguiendo un proceso numérico para la obtención de la solución incremental-iterativo con escalones de tiempo sin contemplar ningún tipo de carga externa. Tras la finalización de la fase de retracción después de los 30 días, se encadena la fase de ensayo en el análisis. En esta fase la carga se aplica localizada en un extremo de las barras de armado (extremo activo) incrementando la carga de forma gradual, con control de carga, para simular la acción del gato hidráulico. En el otro extremo de las barras (extremo pasivo) se han definido unos apoyos fijos para simular la reacción. Para esta fase se ha definido un análisis no-lineal incremental-iterativo con escalones de carga. Los efectos materiales a largo tiempo como la relajación de las armaduras y la fluencia de hormigón no se han tenido en cuenta en la definición del análisis.

Además, en la definición del análisis del modelo 3D-NLFEM-multicrack, se ha considerado la variación aleatoria de la resistencia a tracción del hormigón a través de un factor de aleatoriedad (FRCFAC) que

multiplica la resistencia a tracción en la definición del comportamiento constitutivo del HMAR. De este modo, se ha modelado con más rigurosidad la posible heterogeneidad del hormigón (ver Figura 4). Esta idea fue llevada a cabo de forma muy similar en [17]. Así pues, se espera cierta variabilidad de la respuesta de los tirantes dependiendo de la variabilidad del comportamiento constitutivo del HMAR en los diferentes análisis corridos en el modelo. El campo de variación aleatorio empleado para variar el factor FRCFAC se basa en la descomposición de la matriz de covarianza según Cholesky utilizando una distribución log-normal. En este caso, se ha considerado una variación del FRCFAC del 25% para simular la variabilidad de la resistencia del HMAR (ver Figura 4).

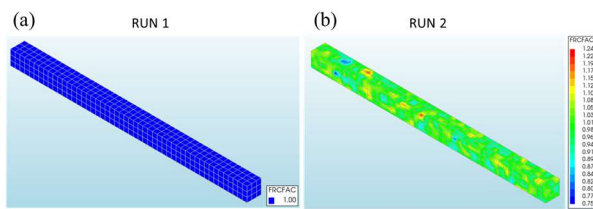


Figura 4. FRCFAC en el 3D-NLFEM-multicrack:
(a) sin ninguna distribución de aleatoriedad y (b) una corrida del modelo con el 25% de variabilidad.

4. Simulación numérica y discusión de los resultados

En esta sección se describe la aplicación del NLFEM y se analizan los resultados obtenidos al comparar con los resultados experimentales.

En la Figura 5 se representan las curvas carga-desplazamiento ($P-\Delta u$) obtenidas como resultado del modelo 3D-NLFEM-multicrack en dos corridas del modelo usando las características del análisis con aleatoriedad descrito anteriormente comparadas con la respuesta experimental media para el tirante de HMAR de 100x100 de sección y $\phi 16$ de diámetro de armadura. Tal y como se observa, las respuestas entre las dos corridas del modelo 3D-NLFEM-multicrack ofrecen resultados muy similares siendo la única diferencia entre ellas la

variación en el comportamiento constitutivo del HMAR dada por el FRCFAC.

En la respuesta mecánica $P-\Delta u$ representada en la Figura 5 se pueden distinguir, claramente las siguientes fases: la *fase no-fisurada* donde la respuesta del tirante de HMAR es elástica, una *fase de aparición de la micro-fisuración* donde la respuesta del tirante empieza a perder su rigidez inicial, una *fase de estabilización de la micro-fisuración* donde tiene lugar el fenómeno de tension-stiffening característico entre el HMAR y el armado y, por último, la *fase de desarrollo de la macro-fisura* en el momento del colapso donde se desarrolla la macro-fisura y el acero de las armaduras plastifica. Como se observa en la figura, el ensayo experimental alcanza hasta la parte de la fase de estabilización de la micro-fisuración donde podría representarse como el límite del comportamiento en servicio. A partir de aquí, resulta muy dificultoso continuar el ensayo generando mucha inestabilidad debida al sistema del test mecánico. No obstante, el ensayo completo ha sido simulado con el 3D-NLFEM-multicrack (Figura 5).

De este modo se puede observar en la Figura 5 como la respuesta $P-\Delta u$ cambia su rigidez desde la fase no fisurada a la fase de estabilización de la micro-fisuración cuando se produce la formación de las micro-fisuras. Debido al desarrollo del patrón distribuido de micro-fisuras característico del HMAR, las tensiones de tracción de la parte micro-fisurada del tirante son transferidas progresivamente del hormigón al acero dando lugar al fenómeno de tension-stiffening. Como se observa, la rigidez en la fase de estabilización de las micro-fisuras permanece relativamente constante hasta el desarrollo de la macro-fisura. De este modo, la macro-fisura se desarrolla como consecuencia de la concentración y fusión de las micro-fisuras en una sección determinada del tirante.

Así pues, como ya se destacó para el caso de vigas armadas a flexión de HMAR en trabajos previos [11,14], la marcada consecuencia del efecto tension-stiffening del HMAR se

representa claramente también en el caso de los tirantes a tracción: la rigidez permanece constante en la fase de estabilización de las micro-fisuras, desde la fase de su formación hasta la fase del desarrollo de la macro-fisura. Esto significa que el HMAR micro-fisurado se comporta de manera lineal debido a la presencia de las fibras, que generan una resistencia extra en la matriz de hormigón en la fase de estabilización de las micro-fisuras. Esto permite el desarrollo de más micro-fisuras repartiendo las tensiones internas en el hormigón en todo el volumen del elemento evitando transferir enteramente las tensiones al armado. Esta resistencia extra puede ser interpretada como una energía de fisura extra durante el proceso de micro-fisuración y resulta en un comportamiento medio relativamente constante y, consecuentemente, en un efecto tension-stiffening relativamente constante. Por tanto, el fenómeno de tension-stiffening se manifiesta en la respuesta a tracción del modelo de forma implícita teniendo en cuenta, además de la colaboración de la resistencia a tracción del hormigón entre fisuras, la resistencia residual en la propia fisura debido a las fibras de acero.

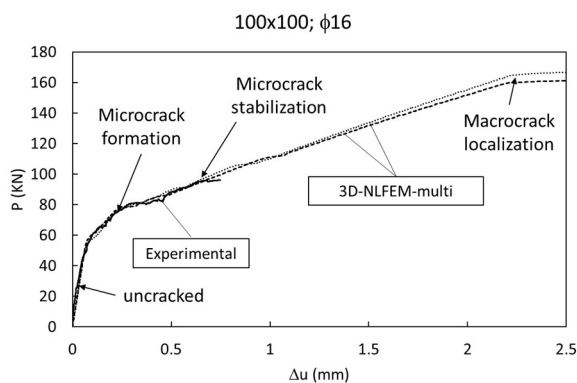


Figura 5. Respuesta P- Δu tirante de 100x100; $\phi 16$ vs modelo 3D-NLFEM-multicrack

Como se observa en la Figura 5, el modelo 3D-NLFEM-multicrack simula con gran precisión el ensayo experimental usando un 60% del incremento de retracción (sh_{inc}) que, aplicando la expresión (1), resulta en una deformación por retracción ($\epsilon_{csUHPRFC}$) de 0.53 mm/m al final de la fase de retracción a los 30 días. Esta $\epsilon_{csUHPRFC}$ genera el estado tensional

interno inicial del HMAR que debe ser tenido en cuenta en el modelo, como estado previo, para simular correctamente el ensayo mecánico. De este modo, en Figura 6, Figura 7 y Figura 8 se muestran las curvas P- Δu ajustadas con el valor de sh_{inc} necesario con el modelo 3D-NLFEM-multicrack, comparadas con la respuesta experimental de los tirantes. Se observa que el modelo ajusta con gran precisión la respuesta experimental media (Experim_50%) adoptada para este estudio.

Usando la expresión (1), es posible obtener la deformación debido al efecto de la retracción responsable del estado tensional interno en el HMAR previo al ensayo de tracción al final de los 30 días ($\epsilon_{csUHPRFC}$), para cada uno de los tipos de tirantes analizados procedentes del ensayo experimental (ver Tabla 3). Así pues, se puede observar que los valores de $\epsilon_{csUHPRFC}$ resultantes de la aplicación del modelo 3D-NLFEM-multicrack y la expresión (1) se encuentran dentro del rango [0.37, 0.73] mm/m. Estos valores de retracción obtenidos se consideran adecuados puesto que entran dentro del rango de deformaciones por retracción esperable para el HMAR contrastados con la literatura específica [1–4]. Además, dado que se ha asumido en el modelo, de forma conservativa, que la retracción post-fisura calculada es igual a la retracción libre, la deformación por retracción real se espera que pudiera ser incluso un poco menor que la calculada, debido a la influencia de la fluencia del hormigón y la posible relajación de las armaduras. De este modo, el rango de $\epsilon_{csUHPRFC}$ obtenido con el modelo constituiría una cota superior.

Además, como se observa en la Tabla 3, el valor de la tensión interna generada en el hormigón debido a la presencia de las armaduras embebidas ($\sigma_{csUHPRFC}$) es muy importante. Es decir, el HMAR que rodea las armaduras se encuentra considerablemente traccionado antes de que tenga lugar el ensayo de tracción del tirante. Esto significa que el hormigón se encuentra pre-traccionado antes del ensayo y,

por tanto, su capacidad de carga frente al ensayo de tracción se ve reducida. Por otra parte, el efecto en el armado es el contrario, es decir, las armaduras longitudinales se encuentran pre-comprimidas antes del ensayo (σ_{ss}).

Por tanto, como consecuencia de estos resultados se puede concluir que el efecto de la retracción en el HMAR no puede ser despreciado ya que su influencia en la respuesta estructural a tracción del elemento de HMAR armado es de gran importancia. Estos resultados son consecuentes y se encuentran alineados con los obtenidos de los ensayos a flexión de vigas de HMAR en trabajos previos [11,14].

Tabla 3. Retracción de los tirantes del NLFEM

Tirante	$\epsilon_{csUHPRFC}$ (mm/m)	$\sigma_{csUHPRFC}$ (N/mm ²)	σ_{ss} (N/mm ²)
60x60; $\phi 10$	0.41	1.39	-62.50
60x60; $\phi 12$	0.48	1.96	-60.29
80x80; $\phi 10$	0.41	0.81	-64.82
80x80; $\phi 12$	0.65	1.14	-63.49
100x100; $\phi 10$	0.73	0.51	-64.00
100x100; $\phi 12$	0.73	0.72	-63.15
100x100; $\phi 16$	0.53	1.25	-61.06

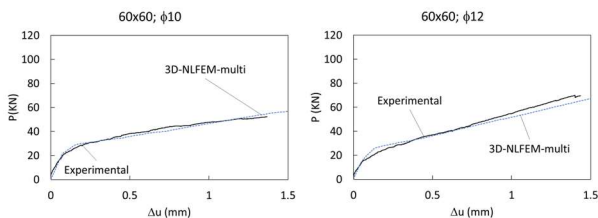


Figura 6. Curvas P- Δu para los tirantes de 60x60

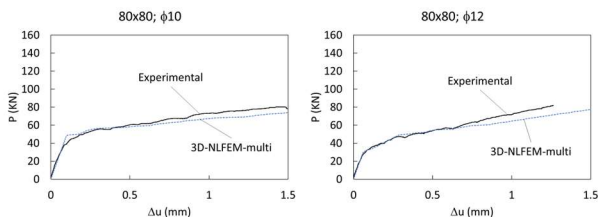


Figura 7. Curvas P- Δu para los tirantes de 80x80

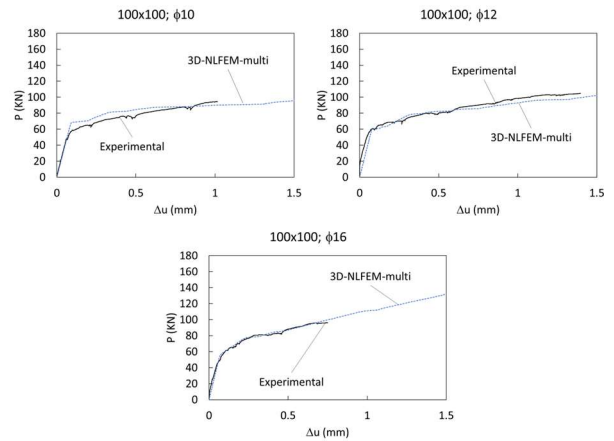


Figura 8. Curvas P- Δu para los tirantes de 100x100

5. Conclusiones

En el presente trabajo se ha estudiado el comportamiento de tirantes de HMAR armados. Se han tratado aspectos críticos para el diseño considerando el efecto de la retracción y las implicaciones de la fisuración en el comportamiento tension-stiffening. Esto se lleva a cabo a través del desarrollo de un modelo no lineal de elementos finitos (NLFEM).

Las respuesta mecánicas de los ensayos experimentales adoptados se han comparado con las simuladas del NLFEM. A través del modelo ha sido posible predecir de forma fiable la deformación por retracción y su influencia en la respuesta mecánica del HMAR durante todas sus fases: la fase de formación de la micro-fisuración, donde el tirante empieza a perder su rigidez inicial, y en la fase de estabilización de la micro-fisuración, donde tiene lugar el fenómeno de tension-stiffening entre el HMAR y el armado.

Las curvas P- Δu obtenidas tras la aplicación del 3D-NLFEM-multicrack se ajustan de manera precisa a las experimentales considerando los parámetros constitutivos obtenidos de la aplicación del método de análisis inverso propio. Esto demuestra la fiabilidad no sólo del NLFEM desarrollado sino también la coherencia del proceso de caracterización del comportamiento constitutivo del HMAR.

La macro-fisura es el resultado de la coalescencia de las micro-fisuras en una sección determinada. Por ello, se puede resaltar la mayor consecuencia del efecto tension-stiffening debido a la presencia de las fibras de acero: la rigidez del tirante permanece constante durante toda la fase de estabilización de la micro-fisuración, desde la formación de la micro-fisuración hasta el desarrollo de la macro-fisura. En este trabajo, el fenómeno tension-stiffening ha sido considerado teniendo en cuenta, no sólo la colaboración de la resistencia a tracción del hormigón entre fisuras, sino también la resistencia residual en las propias micro-fisuras debido al efecto de las fibras.

La deformación por retracción obtenida a partir del modelo 3D-NLFEM-multicrack ($\epsilon_{csUHPRFC}$) se encuentra dentro del rango [0.37, 0.73] mm/m. Este resultado se encaja dentro del rango esperable para el HMAR obtenido de la literatura: [0.60, 0.90] mm/m. Además, se ha considerado, de forma conservativa, que la retracción post-fisura calculada es igual a la retracción libre. Así pues, el rango de retracción obtenido constituye un límite superior.

Cuando se considera la deformación por retracción calculada ($\epsilon_{csUHPRFC}$), se generan unas tensiones internas en el HMAR previas al inicio del ensayo que deben ser tenidas en cuenta debido a su potencial influencia en la respuesta mecánica en servicio del tirante. De este modo, el NLFEM desarrollado es capaz de simular la respuesta estructural del HMAR.

Los resultados de este estudio sugieren que, en el diseño en servicio de elementos estructurales de HMAR armados: (a) es necesario considerar una carga de fisuración reducida debido al efecto de retracción del hormigón en función de la cuantía de armado; (b) se puede asumir un efecto tension-stiffening constante desde el inicio de la fisuración hasta la plastificación, a diferencia del hormigón armado convencional, donde este efecto disminuye con el aumento de la carga aplicada; y (c) es posible garantizar un excelente control de la abertura de

fisura gracias al mantenimiento de un estado de microfisuración previo a la plastificación de las armaduras. Esto convierte a los elementos armados de HMAR en una opción idónea para lograr un alto rendimiento en condiciones de servicio.

Agradecimientos

Este trabajo forma parte del Proyecto “BIA2016-78460-C3-1-R”, financiado por la Agencia Española de Investigación y del Proyecto “CIAICO/2022/045”, financiado por la “Conselleria de Innovación, Universidades, Ciencia y Sociedad Digital, Generalitat Valenciana (ES)”

Referencias

- [1] T. Xie, C. Fang, M.S. Mohamad Ali, P. Visintin, Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study, *Cem Concr Compos* 91 (2018) 156–173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.05.009>.
- [2] C. Fang, M. Ali, T. Xie, P. Visintin, A.H. Sheikh, The influence of steel fibre properties on the shrinkage of ultra-high performance fibre reinforced concrete, *Constr Build Mater* 242 (2020) 117993. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117993>.
- [3] E. Fehling, M. Schmidt, J. Walraven, T. Leutbecher, S. Fröhlich, Ultra-high performance concrete UHPC: Fundamentals, design, examples, John Wiley & Sons, 2014.
- [4] D.-Y. Yoo, N. Banthia, Y.-S. Yoon, Effectiveness of shrinkage-reducing admixture in reducing autogenous shrinkage stress of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete, *Cem Concr Compos* 64 (2015) 27–36. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.09.005>.

- [5] M. Khorami, J. Navarro-Gregori, P. Serna, Experimental methodology on the serviceability behaviour of reinforced ultra-high performance fibre reinforced concrete tensile elements, *Strain* (2020) 13.
- [6] E.J. Mezquida-Alcaraz, J. Navarro-Gregori, P. Serna-Ros, Direct procedure to characterize the tensile constitutive behavior of strain-softening and strain-hardening UHPFRC, *Cem Concr Compos* 115 (2021) 103854. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103854>.
- [7] J.Á. López, Characterisation of the tensile behaviour of UHPFRC by means of four-point bending tests, PhD Thesis, Universitat Politècnica de València, València (2017). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/79740>.
- [8] J.A. López, P. Serna, J. Navarro-Gregori, Advances in the development of the first UHPFRC Recommendations in Spain: Material classification, design and characterization, in: F. Toutlemonde & J. Resplendino T.Ch. (Ed.), *UHPFRC 2017 Designing and Building with UHPFRC: New Large-Scale Implementations, Recent Technical Advances, Experience and Standards*, RILEM Publications SARL, 2017: pp. 565–574.
- [9] E.J. Mezquida-Alcaraz, J. Navarro-Gregori, J.A. López, P. Serna-Ros, Validation of a non-linear hinge model for tensile behavior of UHPFRC using a Finite Element Model, *Computers and Concrete* 23 (2019) 11–23. <https://doi.org/10.12989/cac.2019.23.1.011>.
- [10] E.J. Mezquida-Alcaraz, J. Navarro-Gregori, P. Serna-Ros, Numerical validation of a simplified inverse analysis method to characterize the tensile properties in strain-softening UHPFRC, in: *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, 2019. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/596/1/012006>.
- [11] E.J. Mezquida-Alcaraz, Numerical Modelling of UHPFRC: from the Material to the Structural Element, PhD Thesis, Universitat Politècnica de València, València (2021). <https://doi.org/10.4995/Thesis/10251/167017>.
- [12] AENOR, UNE 83519:2024. Hormigones con fibras. Método de ensayo para la caracterización de la resistencia a tracción por flexión en hormigones con endurecimiento por deformación., UNE 83519:2024 (2024).
- [13] DIANA (Software), User's Manual -- Release 10.2, TNO DIANA, The Netherlands (2017). <https://dianafea.com/manuals/d102/Diana.html>.
- [14] E.J. Mezquida-Alcaraz, J. Navarro-Gregori, J.R. Martí-Vargas, P. Serna-Ros, Effects of tension stiffening and shrinkage on the flexural behavior of reinforced UHPFRC beams, *Case Studies in Construction Materials* 15 (2021) e00746.
- [15] K. Dorr, Ein Beitrag zur Berechnung von Stahlbetonscheiben unter besonderer Berücksichtigung des Verbundverhaltens, PhD Thesis, University of Darmstadt, Darmstadt (1980).
- [16] The European Union Per Regulation 305/2011, D. 2004/18/EC Directive 98/34/EC, EN 1992-1-1: Eurocode 2: Design of concrete structures, EUROPEAN STANDARD (2004).
- [17] P. Rossi, D. Daviau-Desnoyers, J.-L. Tailhan, Probabilistic numerical model of cracking in ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) beams subjected to shear loading, *Cem Concr Compos* 90 (2018) 119–125.