

Fisuración en vigas multicapa de hormigones con fibras de acero

Cracking behaviour in flexural test multilayer steel fibre reinforced concrete beams

Luis Carrillo Alonso^a, Inmaculada Martínez Pérez^b, Alvaro Picazo Iranzo^c,

Jouzas Valivonis^d,

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Profesor Asociado. Dptmto. Tecnología de la Edificación. ETSEM. U.P.M.

. luis.carrillo.alonso@acciona.com

^b Profesora del Dptmto. Construcciones arquitectónicas. ETSEM. U.P.M.

i.martinez@upm.es

^c Profesor del Dptmto. Tecnología de la Edificación. ETSEM. U.P.M.

a.picazo@upm.es

^d Department of Reinforced Concrete and Masonry structures. Vilnius Gedeminas Technical University.

jouzas.valivonis@vgtu.lt

RESUMEN

Esta publicación analiza el fenómeno de la fisuración producida en ensayos de vigas constituidas por 3 capas, superior e inferior de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC) y la intermedia de hormigón convencional (RC). Se comparan los resultados con los obtenidos en vigas convencionales íntegramente de hormigón armado o reforzado con fibras. A partir de los ensayos se evalúa la aproximación de las formulaciones sobre fisuración incluidas en distintos códigos. Adicionalmente, para las vigas tricapa se ha estudiado la influencia de la retracción en la fisuración, que se ha revelado como factor fundamental.

ABSTRACT

This paper analyzed the cracking generated in tested multilayered beams. In this case the beams have three layers: bottom and upper layer with SFRC and the intermediate layer of RC. Results obtained in multilayered beams were compared with those obtained both in conventional RC beams and in complete SFRC beams. Thus cracking in all of those beams was evaluated based in formulae of different codes. Finally the influence of the shrinkage in the behavior of the multilayer beams was studied.

PALABRAS CLAVE: Viga multicapa, hormigón con fibras de acero, fisuración, retracción, modelo elementos finitos.

KEYWORDS: Multilayered beam, steel fiber reinforced concrete, cracking, shrinkage, finite element model

1. Introducción

El uso de fibras de acero como refuerzo de elementos de hormigón en masa o armado es una técnica cada día más extendida hoy en día. Diferentes normativas como el MC2010 [1], el comité ACI 544 1996 [2], la norma de hormigón estructural española EHE08 [3] y el comité RILEM TC 162-TDF [4] avalan este tipo de técnica.

Son conocidas por ello las modificaciones en las propiedades de las mezclas que se consiguen con este tipo de refuerzos, en comparación con el uso de hormigones reforzados de forma convencional. Así, la adición de fibras lleva a pequeños aumentos de la resistencia a tracción del hormigón (Gopalaratnam [5], Shah [6]), mientras que la resistencia a compresión apenas se ve modificada (Johnston [7], Turmo [8]).

Sí es importante el efecto de las fibras en dos sentidos: por un lado, el comportamiento posfisuración se ve completamente modificado (Marar [9], Nelson [10]) produciéndose un notable aumento de la ductilidad de las piezas (Kaltacky [11], Vandewalle [12]) alcanzándose deformaciones muy superiores (Johnston [13]). Este aspecto tiene repercusión en el comportamiento a flexión de las piezas de hormigón con fibras.

En cuanto a la resistencia a cortante, el uso de fibras tiene en este caso un efecto similar al de las barras de armadura pasiva (Williamson [14]), por lo que, tal y como se recoge en las normativas antes indicadas, la contribución de la fibra en este caso es significativa.

Algunas investigaciones se han centrado en determinar la influencia del volumen de fibras y el contenido óptimo, resultando que dosificaciones excesivas pueden incluso llegar a tener un efecto negativo en las propiedades de la mezcla.

Otro aspecto a destacar de la contribución de las fibras es la reducción de la separación media entre fisuras, y por lo tanto de

la apertura de fisura generada (Grolí [15], Logfren [16]).

La adición de fibras en cambio apenas modifica los efectos de la retracción del hormigón, tal y como han contrastado varios autores (Hannant 1984 [17]).

Los usos actualmente más extendidos son la aplicación en el refuerzo de pavimentos de hormigón y en la ejecución de dovelas prefabricadas de túneles. Estos usos han quedado normalizados en diferentes códigos como el DAUB [18], el CEB-FIB [19] y el ACI [20].

A su vez, nuevas aplicaciones basadas en el empleo de fibras como sustituto o complemento del refuerzo convencional del hormigón o complemento de éste se han comenzado a extender en distintos elementos estructurales. Además, dado el relativamente alto coste de las fibras, se ha procedido al estudio de un uso óptimo de éstas. Por este motivo se ha planteado la ejecución de vigas donde la presencia de fibras se concentre sólo en las capas más exteriores, siendo así sus propiedades aprovechadas de forma más adecuada.

Por otra parte, otras líneas de investigación que se han desarrollado en los últimos años han sido las relacionadas con el comportamiento de las vigas conformadas por varias capas de materiales con distintas propiedades. En este sentido son de destacar las investigaciones realizadas por Marciukaitis [21] [22] y Olmedo [23]. Dichas investigaciones se han centrado en el estudio del uso de hormigones ligeros en las capas intermedias de elementos lineales para así mejorar la capacidad de aislamiento térmico, que proporciona el hormigón poroso, en elementos como losas prefabricadas para forjados de viviendas. Estas investigaciones han revelado la importancia de los efectos reológicos (Jucknevičius [24]) sobre las tensiones desarrolladas en estos elementos

multicapa, antes incluso de ser sometidos a cargas exteriores.

En cambio, las investigaciones realizadas sobre el comportamiento de vigas multicapa con hormigones reforzados con fibras resultan escasas. Es por ello que Martínez Pérez [25] de la ETSEM de la UPM, en colaboración con el TU Vilnius procedieron a desarrollar un programa experimental, donde se ensayaron vigas compuestas por capas (MC) de hormigones convencionales (RC) y reforzados con fibras (SFRC).

En este artículo se ha procedido a utilizar los datos obtenidos de aquella investigación para realizar un estudio de la fisuración generada en dichas vigas. Para ello se ha realizado tanto un análisis e interpretación de los resultados obtenidos, como un estudio teórico que justifique dicho comportamiento. Con esta intención se han generado modelos teóricos de cálculo con elementos finitos que han permitido comprender cuál ha sido realmente el comportamiento de la pieza.

2. Programa de ensayos

El programa de ensayos desarrollado por Martínez Pérez consistió en la ejecución de 8 vigas de sección rectangular con dimensiones 150x300 mm y una longitud de 3'00 m. De las 8 vigas, 2 se ejecutaron íntegramente con hormigón RC, otras 2 íntegramente con hormigón SFRC, y las 4 restantes se hormigonaron en 3 capas (MC). De estas últimas 2 fueron con capas de espesores 10+10+10 cm (MC2) y las otras 2 con capas de espesores 5+20+5 (MC1) cm, siendo en ambas las capas intermedias de hormigón RC y las exteriores de hormigón SFRC.

Los hormigones a colocar se ensayaron a su vez en una serie de probetas cilíndricas y cúbicas que permitieron la obtención de las resistencias a compresión de los hormigones colocados.

Adicionalmente se dispuso en dichas vigas una armadura longitudinal en la cara inferior de 2Ø14, y en la cara superior de 2Ø6, mientras que como armadura de cortante se dispuso un refuerzo de Ø6/0'15. La armadura de refuerzo se conformaba con acero B500S. Las fibras empleadas como refuerzo fibras de la marca Bekaert tipo Dramix 55/30 BG, con una longitud de 30 mm y un diámetro de 0'55 mm.

Las vigas multicapa se hormigonaron con una diferencia de 3 días entre cada una de ellas, no ejecutándose ningún tratamiento específico en la superficie de contacto.

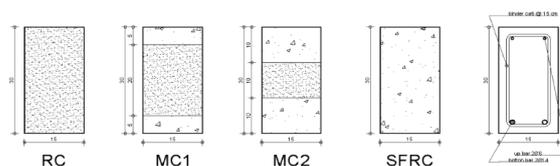


Figura 1. Esquemas tipos de vigas ensayadas

Las 8 vigas fueron sometidas al ensayo estándar de flexión de 4 puntos. La luz de cálculo fue de 2'50 m. Todas las vigas fueron monitorizadas por un conjunto de 20 extensómetros (ver Fig 2), los cuales permitieron medir deformaciones y movimientos, de tal manera que en todo momento se pudiera conocer el estado tensional y deformacional del conjunto de la viga.



Figura 2. Disposición de extensómetros en viga

De cada una de estas vigas se obtuvieron los diagramas (ver Fig 3) carga-deformación correspondientes, donde se pudieron identificar los puntos donde se produjo la fisuración del hormigón, la plastificación de la armadura, la carga máxima y la carga última.

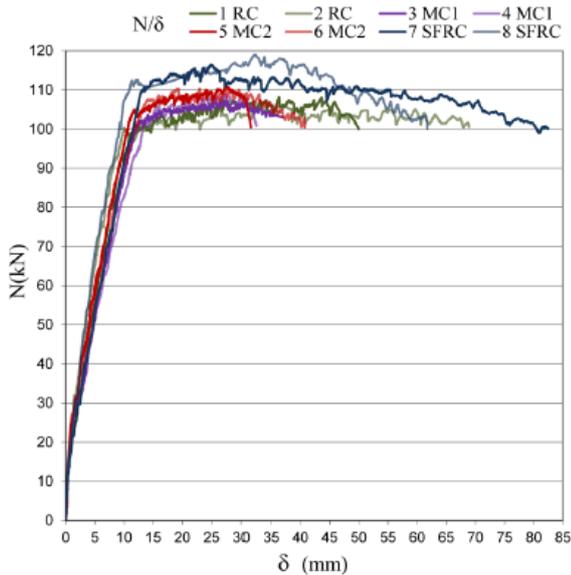


Figura 3. Diagramas carga desplazamiento para cada una de las vigas ensayadas

Las 8 vigas fallaron debido a que se produjo el aplastamiento del hormigón en la zona comprimida, después de haberse plastificado a su vez las armaduras pasivas. Las diferencias encontradas entre los valores significativos de las cargas obtenidos en cada una de las diferentes vigas fueron mínimas (ver Fig. 4), tanto para el momento de fisuración, como para el de plastificación de las armaduras, el máximo y el último. No así ocurrió con las deformaciones (ver Fig 4), donde se obtuvieron deformaciones en general superiores en los casos de las vigas con hormigones reforzados con fibras SFRC, respecto de las vigas con hormigón convencional RC, siendo los casos de las vigas multicapa MC donde se observó una menor deformación respecto de las dos anteriores.

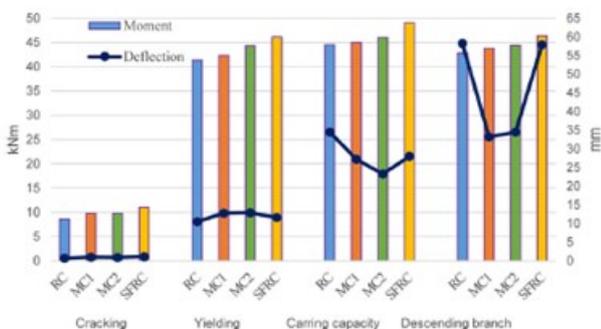


Figura 4. Momentos y deformaciones alcanzadas en los instantes singulares del ensayo

Adicionalmente, durante todo el proceso de ensayo de las vigas se realizó un seguimiento

de la fisuración de las vigas, identificándose y midiéndose cada una de ellas y dejándose registrado y fotografiado este aspecto en cada uno de los escalones de carga desarrollados.

3. Análisis de los resultados

A partir de los datos obtenidos en los ensayos anteriormente descritos, se procedió a analizar la fenomenología y el patrón de las fisuras generadas en las vigas. A continuación se detalla el estudio realizado de cada una de ellas, distinguiendo entre los 3 tipos de vigas ensayadas: vigas RC, vigas SFRC y vigas multicapa MC.

3.1 Fisuración en vigas RC

Desde el punto de vista teórico se pueden calcular las separaciones medias entre fisuras que se deberían producir para el caso en estudio, según las distintas normativas.

En primer lugar, aplicando la formulación correspondiente al MC2010, resultaría:

$$S_m = 151 \text{ mm}$$

en cambio según RILEM se obtiene:

$$S_m = 134 \text{ mm}$$

mientras que con la formulación del EC resulta:

$$S_m = 77 \text{ mm}$$

y con la expresión de la EHE08 se llega a:

$$S_m = 99 \text{ mm}$$

Dichas diferencias dependen únicamente de la distinta formulación empleada y de la distinta consideración del área eficaz en el caso de la EHE08.

A su vez, el patrón de las fisuras de las 2 vigas RC, (ver Fig 5), una vez alcanzada la carga de agotamiento, se pudo medir y cuantificar a partir de los registros y fotografías, de tal forma que se pudo estimar un valor medio de la separación entre fisuras de:

$$\text{en viga -1: } S_m = 104 \text{ mm}$$

$$\text{en viga -2: } S_m = 93 \text{ mm}$$

Estos valores son inferiores a los que predice el MC2010 y RILEM, pero por el contrario son muy próximos a los de EHE08 y superiores a los del EC2 [26].

De los registros se deduce a su vez que la fase de fisuración estabilizada se alcanzó con entorno al 30% de la carga final, desarrollándose desde ese momento la progresión de las fisuras en altura hasta alcanzarse una profundidad del bloque de compresiones de menos de 5 cm.

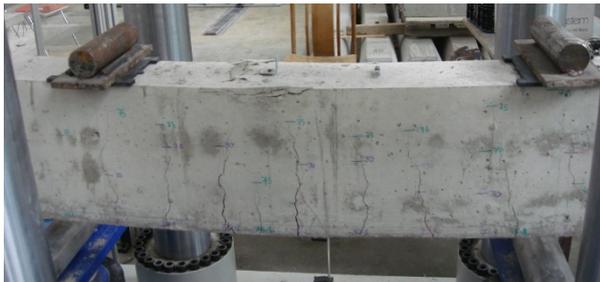


Figura 5. Patrón de fisuras en viga RC

3.2 Fisuración en vigas SFRC

Para las dos vigas ensayadas de SFRC, el patrón de fisuración final puede observarse en la Fig 6.



Figura 6. Patrón de fisuras en viga SFRC

En este caso el patrón es más o menos similar al caso de las vigas RC, con fisuras progresando hasta los 5 cm superiores de la viga, con fisuras más o menos verticales continuas. Si se pudo apreciar un mayor número de fisuras respecto del caso de las vigas RC, lo que suponía que las separaciones medias entre fisuras eran menores.

Así, a partir de los registros y fotografías se pudo deducir que el promedio en las dos vigas de las separaciones medias era:

$$S_m = 87 \text{ mm}$$

Resultados que de nuevo, quedan muy ajustados a los previstos por la formulación del código español EHE08, adaptada para los SFRC con el factor corrector de la esbeltez de las fibras, dado por el RILEM. En este caso, según EHE-08:

$$S_m = 99 \cdot 50 / (30 / 0.55) = 91 \text{ mm.}$$

Con la expresión del RILEM se obtendría:

$S_m = 134 \cdot 50 / (30 / 0.55) = 122 \text{ mm}$, superior en un 40% al valor medio de las vigas ensayadas.

Para la utilización de la expresión del Model Code 2010, sería necesario conocer el valor del parámetro f_{R1} (resistencia residual a flexotracción, correspondiente a la abertura de fisura de 0.5 mm del ensayo propuesto por EN 14651), pero al no haberse realizado ensayos de este tipo se desconocía el valor de dicho parámetro, por lo que no era posible calcular S_m directamente con este procedimiento. Sin embargo, en base a dicha formulación, sí se podía deducir que el valor del parámetro α (f_{R1}/f_{ctm}) tendría que ser de valor 0.9 para obtener resultados de S_m cercanos a los de las vigas ensayadas. Por el contrario, el valor de α para los tipos de hormigones y fibras utilizados se estimaría normalmente en torno a 0.6, valor con el que se obtendría una separación media entre fisuras de 106 mm, superior en un 20% a los valores reales.

3.3 Fisuración en vigas multicapa

En el caso de las vigas multicapa, tanto el caso de las vigas MC1 como el caso de las vigas MC2 presentaron un patrón de fisuras completamente diferente al observado en los casos anteriores.

En estos casos resultaba como principal particularidad el hecho de que las fisuras de la capa inferior no coincidían en general con las de la capa intermedia, tal como se aprecia en las Fig 7. Es decir, que las fisuras no progresaban de forma continua a lo largo de toda la altura de la viga. Además, en todos los casos se observaba una densidad de fisuras mucho mayor en la capa inferior, de SFRC, a la registrada en la capa intermedia, de RC. A su vez las aperturas de fisura registradas son en la mayoría de los casos mayores en la capa intermedia que en la capa inferior.



Figura 7. Patrón de fisuración en vigas MC1(sup) y MC2(inf)

4. Análisis del comportamiento de las vigas

En base al análisis de los resultados de la experimentación anterior y para conocer cuál es el origen de la diferencia en el patrón de fisuras encontrado en las vigas multicapa MC respecto de las vigas monocapa RC y SFRC, se desarrolló el estudio que se describe a continuación.

En un principio cabría pensar que el origen de la discontinuidad en las fisuras podría deberse al movimiento relativo entre capas, causado por la existencia de tensiones rasantes por encima de la resistencia de la junta. Es decir, que dado que la resistencia a tracción de los hormigones de las 3 capas eran iguales, según los resultados obtenidos en los ensayos, puesto que la adición de las fibras no la modificaba, las fisuras que progresaban en la capa inferior al alcanzar el contacto con la intermedia deberían haber progresado también en ella, salvo que se hubiera producido la separación entre capas.

Para que se produjera esta separación, según el MC-2010, debería superarse la capacidad a rasante de esta junta entre hormigones, teniendo en cuenta que en la zona central de las vigas no existían tensiones

normales a las juntas, es decir, $\sigma_n=0$. Así, considerando, de forma conservadora, que la rugosidad de las juntas es del tipo liso, se obtendría un valor resistente de:

$$\tau_u \approx 1.03 \text{ MPa}$$

de los cuales 0.5 N/mm^2 se deberían a la adherencia entre hormigones y 0.53 N/mm^2 al término de rozamiento generado por la armadura que atraviesa las juntas. Por tanto, el valor total de 1.03 MPa correspondería a la capacidad última que se dispondría en todo el contacto, aunque podría ocurrir que localmente se produjera el deslizamiento entre capas con un valor de 0.5 MPa .

En cambio, hay que tener en consideración que en la zona central de las vigas ensayadas el esfuerzo cortante es nulo, por lo que igualmente sería nula la tensión tangencial generada por este esfuerzo. Es decir, que en esta zona las tensiones tangenciales en las juntas siempre son inferiores por tanto a τ_u , y en consecuencia no debería producirse el despegue entre capas en la zona central. Es decir, que la aparición de un patrón de fisuras diferente entre las capas inferiores y la intermedia no puede venir causado sólo por las acciones exteriores aplicadas durante los ensayos de las vigas.

En este punto es interesante tener en cuenta las investigaciones de Jucknevičius[24] y Marciukaitis[22], en relación a la importancia de considerar los efectos que causan la reología de hormigones con distintas propiedades. En los casos analizados por estos autores las diferencias se deben al uso de hormigones de distintas propiedades en cada capa, pero en nuestro caso las propiedades de los hormigones, según los resultados de los ensayos, son idénticas en todas ellas. En cambio, se podría plantear si el comportamiento observado se debe a las deformaciones impuestas por la distinta retracción del hormigón colocado en cada capa, al tener diferentes edades cada uno de ellos.

En el caso de las vigas MC, el hormigonado de las tres capas se ha realizado con un decalaje de tres días entre ellas, lo que genera diferencia de retracción entre capas, tanto por las distintas de edades como por los diferentes espesores y perímetros expuestos a la atmosfera de cada capa.

Se decidió por ello estudiar este efecto mediante el uso de modelos de elementos finitos que permitieran evaluar la influencia de este aspecto sobre las tensiones totales aparecidas en las vigas.

Así, para estudiar el efecto tensional de la retracción sobre el hormigón, se han generado 2 modelos de elementos finitos, uno para las vigas MC1 y otro para las MC2. El elemento utilizado es plano rectangular, de 3 grados de libertad por nodo, con las formas de la deformación lineal en ambas direcciones del plano y permite la desactivación y activación de elementos. El tamaño del elemento considerado ha sido de 1 cm, por lo que el nº de elementos total de cada modelo es de 9000.

Se ha estudiado la retracción durante 34 días, momento en el que la capa superior alcanza los 28 días y se realiza la puesta en carga de las vigas. Se ha dividido este tiempo en etapas de 6 + 3 + 3 + 4 + 5 + 6 + 7. En la primera etapa, a los 6 días, fecha en la que se hormigona la capa superior, los elementos que representan a esta

capa se han desactivado. Para las restantes etapas, todos los elementos se encuentran activos.

El comportamiento del material considerado es elástico. El módulo de elasticidad de cada capa, para cada etapa es variable, función de la edad del hormigón en el tiempo medio entre la propia etapa y la anterior.

La retracción en cada etapa y capa se ha obtenido con la expresión del Eurocódigo-2, resultando para la etapa final los siguientes valores:

Capa	MC1(5+20+5)	MC2(10+10+10)
Superior	$-27 \cdot 10^{-5}$	$-20.65 \cdot 10^{-5}$
Intermedia	$-13.75 \cdot 10^{-5}$	$13.75 \cdot 10^{-5}$
Inferior(*)	$-27.26 \cdot 10^{-5}$	$-17.8 \cdot 10^{-5}$

Figura 10. Resultados en tensiones normales σ_x
 (*) A los valores de la capa inferior se les ha restado la retracción de los 3 primeros días.

En las deformadas de las vigas obtenidas de los modelos correspondientes a las vigas MC1 y MC2, Fig 8, se aprecia, además del acortamiento longitudinal, una curvatura de la pieza con centro de rotación situado por encima de ella.



Figura 8. Deformada de la viga MC bajo el efecto de la retracción diferencial entre capas

En cuanto a las tensiones tangenciales, τ_{xy} , como se observa en la Fig 9, aparecen valores importantes, ± 0.923 MPa en MC1 y ± 0.665 MPa en MC2, en ambos extremos de las dos juntas, pero en la zona central del modelo el valor alcanzado es prácticamente nulo, por lo que no pueden ser la causa de la separación entre capas.

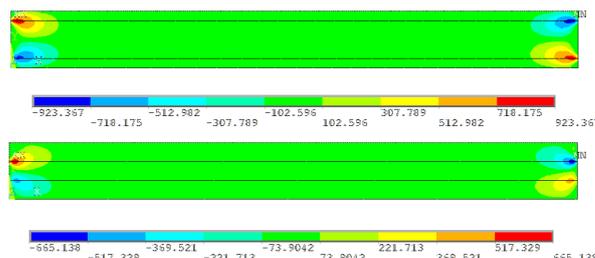


Figura 9. Tensiones τ_{xy} en vigas MC1 y MC2

Respecto a las tensiones longitudinales, σ_x , como se observa en la Fig 10, son nulas en los extremos del modelo, mientras que en la zona central, las dos capas exteriores quedan

sometidas a tracciones constantes de valor 2.78 MPa en MC1 y 1.1 en MC2, y por el contrario, en la capa intermedia están sujetas a compresiones de valor entre -1.55 y -1.01 MPa.

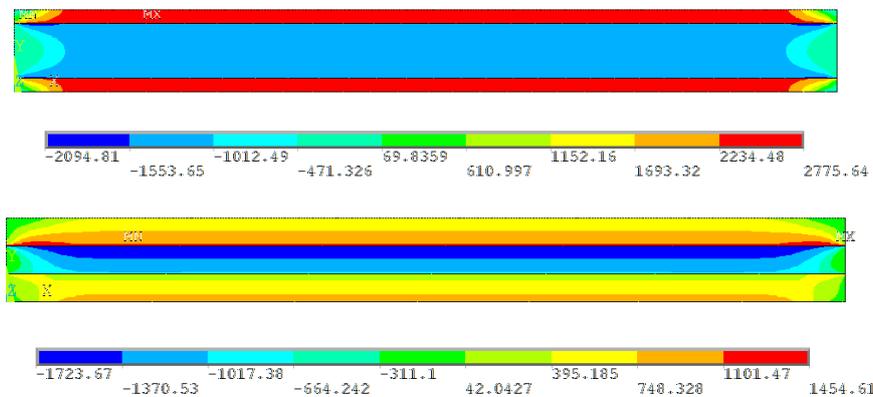


Figura 10. Tensiones σ_x en vigas MC1 y MC2

Por último, se muestran las tensiones verticales, σ_y , Fig 11, observándose que son nulas en todo el modelo salvo en sus extremos. Por lo que el supuesto de que no existen tensiones normales a las interfaces es correcto.

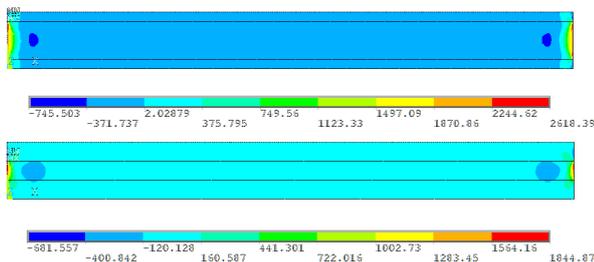


Figura 11. Tensiones σ_y en vigas MC1 y MC2

De esta forma se puede observar, en ambos modelos de cálculo, que el estado tensional previo causado por la actuación de la retracción en cada una de las capas, genera una diferencia clara entre las tensiones de la capa inferior y de la intermedia, previa a la puesta en carga de las vigas.

Este retraso en las tensiones normales causado por la retracción, comprimiendo la capa intermedia respecto de las exteriores, justifica de manera clara el que no exista coincidencia entre las fisuras de ambas, produciéndose despegues locales en la interface. Es decir, que al aplicar las acciones exteriores, existe un estado inicial de tensiones no nulo, provoca que la fisuración sea distinta entre capas. Sería entonces este efecto

sumado al de las acciones exteriores el que permitiera justificar el patrón de fisuras encontrado en las vigas MC.

Por otra parte, en relación a la separación entre fisuras en la capa inferior, en las 4 vigas MC, se sitúa en torno a los 90 mm, que corresponde al valor del hormigón SFRC, mientras que la fisuración de la capa intermedia, en la que ya no existen barras longitudinales que permitan promediar la separación entre fisuras, esta aumenta de manera considerable y de forma aleatoria.

5. Conclusiones

A la vista de lo desarrollado en los epígrafes anteriores se puede concluir que:

- Los patrones de fisuración encontrados en las vigas RC y SFRC concuerdan de forma relativamente aproximada con lo que predicen las distintas normativas analizadas.
- Que son las diferencias entre las distintas formulaciones empleadas en la normativa las que llevarían a algún tipo de discrepancia, siendo las formulaciones del EC2 y la EHE08 las que mejor se han ajustado a los resultados finalmente encontrados.

- Que las diferencias entre las separaciones medias de fisura de las vigas RC y SFRC, menores en estas últimas, resultan acorde a lo que predice la normativa.

- Que en el caso de las vigas multicapa el patrón de fisuras que se produce en las capas exteriores es completamente distinto del que resulta en las capas intermedias, no existiendo continuidad entre fisuras en una y otra capa.

- Que dichas diferencias no pueden deberse únicamente a las acciones exteriores aplicadas durante los ensayos, ya que las tensiones tangenciales generadas en la junta, en la zona central, son nulas, al ser nulo el esfuerzo cortante, por lo que no se pueden deber a un posible desplazamiento relativo entre capas el causante de este efecto.

- Sí es importante, dada la distinta edad de los hormigones de cada capa, el efecto de las acciones reológicas del hormigón. Así la retracción en las vigas multicapa genera unas deformaciones impuestas de mayor cuantía en las capas exteriores respecto de las intermedias. Estas deformaciones quedan a su vez coartadas por la presencia de las capas ya hormigonadas, lo que lleva a la generación de un conjunto de esfuerzos autoequilibrados entre capas, de compresión en las capas intermedias y de tracción en las capas exteriores. Es decir, que las capas exteriores se deforman menos que si no estuvieran en contacto con otros hormigones, y a su vez la capa intermedia se comprimirá por el efecto diferencial con las exteriores.

De esta manera, el efecto de la retracción diferencial entre capas provoca un estado tensional previo a la aplicación de las cargas exteriores, el cual genera un retraso en las tensiones de tracción totales que aparecen en la capa intermedia respecto de las capas exteriores. Es este estado tensional conjunto de acciones reológicas+exteriores, el que justifica la no continuidad de las fisuras entre capas.

Finalmente se puede añadir que al no existir continuidad de estas fisuras, la no presencia de armadura longitudinal en la capa

intermedia conlleva la generación de fisuras en estas capas con separaciones de fisuras aleatorias y anchos superiores a los de las capas exteriores.

Agradecimientos

Es necesario resaltar que todos los ensayos antes mencionados se desarrollaron en Laboratorio del “Departamento de hormigón armado y estructuras de fábrica” del Vilnius Gediminas Technical University, por lo que es necesario agradecer a su personal el trabajo realizado.

Referencias

- [1] FIB International Federation for Structural Concrete, 2012. “Model Code 2010, final draft”, vol 1 and 2.
- [2] ACI 544. 1996. “State of art report fiber reinforced concrete”. American concrete institute.
- [3] EHE08. 2008. “Instrucción de Hormigón Estructural”, Ministerio de Fomento, Gobierno de España,
- [4] RILEM TC 162-TDF, 2003. “Test and design method: Final recommendation. Materials and structures”. Vol 36.
- [5] Gopalaratnam, V.S.; Shah, S.P. 1987. “Tensile failure of steel fiber reinforced mortar”. Journal of Engineering Mechanics 113(5).
- [6] Shah, S.P.; Stroeven P.; Dalhuisen, D; Van Stekelenburg, P. 1978. “Complete stress-strain curves for steel fibre reinforced concrete in uniaxial in tension and compression”. Testing and test methods of fibre cement composites. RILEM Symposium. Construction press.
- [7] Johnston, C.D. 1980. “Properties of steel fibre reinforced mortar and concrete”. Proceedings of International Symposium on fibrous concrete CI-80. Construction press, Lancaster.
- [8] Turmo, J.; Bhantia, N.; Gettu, R.; Barragán, B.. 2008. “Study of the shear behavior of fibre reinforced concrete beams”. Materiales de construcción.

- [9] Marar, K.; Eren, O.; Celik, T. 2001. "Relationship between impact energy and compression toughness energy of high-strength fiber-reinforced concrete". *Materials letters* 47(4/5).
- [10] Nelson, P.K.; Li, V.C.; Kamada, T. 2002. "Fracture toughness of microfibre reinforced cement composites". *Journal of materials in Civil Engineering* 14(15).
- [11] Katalcky, M.Y.; Arslan, M.H.; Yilmaz, U.S. 2007. "The effects of steel fibre reinforced concrete on system ductility". *Materiales de construcción*.
- [12] Vandewalle, L. 2000. "Cracking behavior of concrete beams reinforced with a combination of ordinary reinforcement and steel fibres". *Materials and structures* 33.
- [13] Johnston, C.D. 1974. "Steel fibre reinforced mortar and concrete - a review of mechanical properties" in *Fiber reinforced concrete, SP-44*. American concrete institute.
- [14] Williamson, G.R.; 1978. "Steel fibres as web reinforcement in reinforced concrete" *Proceedings of U.S. Army Science Conference*. West Point.
- [15] Grolí, G. 2004. "Crack width control in RC elements with recycled Steel fibres and applications to integral structures. Theoretical and experimental study". *Tesis Doctoral, Univ. Politécnica de Madrid*,
- [16] Logfren, I.; 2005. "Fibre-reinforced concrete for industrial construction – a fracture mechanics approach to material testing and structural analysis". *PhD Thesis. Dep. Of Civil and environmental Engineering. Chalmers University. Goteborg*.
- [17] Hannant, D.J. 1984. "Fibre cements and fibre concretes". Chichester. Wiley&Sons.
- [18] DAUB. 2013. "Recommendations for the design, production and installation of segmental rings". ITA-AITES
- [19] CEB-FIP Bulletin n°83. 2017. "Precast tunnel segments in fibre reinforced-concrete". *Federation internationale du beton*.
- [20] ACI 544.7R-16. "Report on design and construction of fiber-reinforced precast concrete tunnel segments". *American Concrete Institute. Detroit*.
- [21] Marciukaitis, G.; Juknevičius, L. 2002. "Influence of the internal layer cracks on the cracking of flexural three-layer concrete members". *Journal of Civil Engineering and Management*.
- [22] Marciukaitis, G.; Juknevičius, L. 2010. "Influence of the initial state of stress and strain on the cracking of shear section of layered reinforced concrete structures". *Proceedings of 10th International conference. Vilnius. Modern building materials, structures and techniques*.
- [23] Olmedo, F.I.; Valivonis, J.; Cobo-Escamilla, A. 2017. "Experimental study of multilayer beams of lightweight concrete and normal concrete". *Procedia Engineering* 172. *Modern building materials, structures and techniques*.
- [24] Jucknevičius, L.; Marciukaitis, G.; Valivonas, J. 2006. "Influence of technological factors on the state of stress and strain in three-layer reinforced concrete structures". *Journal of Civil Engineering and Management*.
- [25] Martínez-Pérez, I.; Valivonis, J.; Salna, R.; Cobo-Escamilla, A. 2017. "Experimental study of flexural behaviour of layered Steel fibre reinforced concrete beams". *Journal of Civil Engineering and Managements*.
- [26] Eurocode 2. EN1992-1-1. 2002. "Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings".