

Competición a ciegas de simulaciones numéricas del fallo a cortante de vigas de hormigón reforzado con fibras

Blind Competition on the Numerical Simulation of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Beams Failing in Shear

Joaquim Barros¹, Beatriz Sanz², Petr Kabele³, Rena C. Yu⁴, Günther Meschke⁵, Jaime Planas², Vitor Cunha⁶, Antonio Caggiano⁷, Nilüfer Ozyurt⁸, Ventura Gouveia⁹, Ab van den Bos¹⁰, Elisa Poveda⁴, Erez Gal¹¹, Jan Cervenka¹², Gerrit E. Neu¹³, Pierre Rossi¹⁴, Daniel Dias-da-Costa¹⁵, Peter K. Juhasz¹⁶, David Cendon², Gonzalo Ruiz⁴, Tiago Valente¹⁷

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería, Universidad de Miño, Guimarães, Portugal -

² Departamento de Ciencia de Materiales, ETSI de Caminos, C. y P., Universidad Politécnica de Madrid, España -

³ Czech Technical University in Praga, República Checa - ⁴ Universidad de Castilla-La Mancha, España

⁵ Institute for Structural Mechanics, Ruhr University Bochum, Alemania - ⁶ ISISE, Institute of Science and Innovation for Bio-Sustainability (IB-S), Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Miño, Portugal - ⁷ Technische Universität Darmstadt, Alemania - ⁸ Bogazici University, Turquía - ⁹ Instituto Politécnico de Viseu, Portugal - ¹⁰ DIANAFAEA, Países Bajos -

¹¹ Ben-Gurion University of Negev, Israel - ¹² Cervenka Consulting s.r.o., Praga, República Checa - ¹³ Institute for Structural Mechanics, Ruhr University Bochum, Alemania - ¹⁴ University of Eiffel, Francia - ¹⁵ The University of Sydney, Australia - ¹⁶ Budapest University of Technology and Economics, Hungría - ¹⁷ CiviTest-Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Portugal

Recibido el 17 de junio de 2021; aceptado el 5 de enero de 2022

RESUMEN

La investigación experimental ha demostrado el extraordinario potencial de la adición de fibras cortas a los materiales cementicios, ya que mejoran significativamente el comportamiento de estructuras de hormigón en los estados límite de servicio y último. Para la simulación del comportamiento no lineal del material en estructuras de hormigón reforzado con fibras se utilizan programas informáticos basados en el método de elementos finitos. Generalmente, las aproximaciones existentes se evalúan en simulaciones de ensayos experimentales de elementos estructurales a pequeña escala, donde los valores de los parámetros de las leyes constitutivas de los materiales se ajustan según el resultado deseado. La utilidad de esta técnica inversa para el diseño estructural es discutible. Precisamente, para evaluar el comportamiento predictivo de dicho enfoque, se organizó una competición a ciegas de simulaciones numéricas. Para ello, se ensayaron hasta rotura, a flexión en tres puntos asimétrica, dos vigas gemelas de hormigón reforzado con fibras de acero de sección en T, reforzadas longitudinalmente con barras de acero y sin cercos en el vano de cortante crítico. A pesar de proporcionar los datos experimentales para la definición de los parámetros mecánicos más relevantes, las simulaciones numéricas dieron resultados dispares en la capacidad de carga, la flecha y la deformación en carga máxima, con variaciones de hasta un 40%, 113% y 600% respectivamente. Además, se obtuvieron modos de fallo y resultados muy diferentes con el mismo programa comercial pero distinto participante, lo que manifiesta la necesidad de un análisis más profundo y de una mejor comprensión de los modelos numéricos y de la influencia de sus parámetros en su capacidad predictiva.

2022 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.

Licencia de uso *Creative Commons* (CC BY-NC-ND 3.0).

PALABRAS CLAVE: Ensayos de referencia, hormigón reforzado con fibras, análisis no lineal por elementos finitos, vigas de hormigón armado, fallo por cortante.

Traducción realizada por Elisa Poveda y Gonzalo Ruiz del artículo original publicado en la revista *Structural Concrete*, editada por Wiley. J. Barros, B. Sanz, P. Kabele, R.C. Yu, G. Meschke, J. Planas, V. Cunha, A. Caggiano, N. Ozyurt, V. Gouveia, A. van den Bos, E. Poveda, E. Gal, J. Cervenka, G.E. Neu, P. Rossi, D. Dias-da-Costa, P. K. Juhasz, D. Cendon, G. Ruiz, T. Valente. Blind competition on the numerical simulation of steel-fiber-reinforced concrete beams failing in shear. *Structural Concrete* 22 (2021) 939–967. DOI: 10.1002/suco.202000345

* Persona de contacto / *Corresponding author*: Correo-e / email: barros@civil.uminho.pt (Joaquim Barros).

Cómo citar este artículo: Barros, J. et al. (2022) Competición a ciegas de simulaciones numéricas del fallo a cortante de vigas de hormigón reforzado con fibras. *Hormigón y Acero*, 73 (296) 17-39. <https://doi.org/10.33586/hya.2022.3074>

ABSTRACT

Experimental research has shown the extraordinary potential of the addition of short fibers to cement-based materials by improving significantly the behavior of concrete structures for serviceability and ultimate limit states. Software based on the finite element method has been used for the simulation of the material nonlinear behavior of fiber-reinforced concrete (FRC) structures. The applicability of the existing approaches has often been assessed by simulating experimental tests with structural elements, in general of a small scale, where the parameter values of the material constitutive laws are adjusted for the aimed predicting level, which constitutes an inverse technique of arguable utility for structural design practice. For assessing the predictive performance of these approaches, a blind simulation competition was organized. Two twin T-cross section steel FRC beams, flexurally reinforced with steel bars and without conventional shear reinforcement in the critical shear span, were experimentally tested up to failure. Despite the experimental data provided for the definition of the relevant model parameters, inaccuracies on the load capacity, deflection, and strain at peak load attained 40, 113, and 600%, respectively. Inadequate failure modes and highly different results were estimated with the same commercial software, indicating the need for deeper analysis and understanding of the models and influence of their parameters on their predictive performance.

2022 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.

Creative Commons License (CC BYNC-ND 3.0).

KEYWORDS: Benchmark, fiber-reinforced concrete, material nonlinear finite element analysis, reinforced concrete beams, shear failure.

Translated by Elisa Poveda and Gonzalo Ruiz from the original article published in the Journal Structural Concrete, published by Wiley. J. Barros, B. Sanz, P. Kabele, R.C. Yu, G. Meschke, J. Planas, V. Cunha, A. Caggiano, N. Ozyurt, V. Gouveia, A. van den Bos, E. Poveda, E. Gal, J. Cervenka, G.E. Neu, P. Rossi, D. Dias-da-Costa, P. K. Juhasz, D. Cendón, G. Ruiz, T. Valente. Blind competition on the numerical simulation of steel-fiber-reinforced concrete beams failing in shear. *Structural Concrete* 22 (2021) 939–967. DOI: 10.1002/suco.202000345

Notación

3PNBBT	Ensayo de flexión en tres puntos en vigas entalladas (<i>3-Point Notched-Beam Bending Test</i>)	R/FRC	Hormigón reforzado con fibras con armadura convencional (<i>Reinforced/Fiber Reinforced Concrete</i>)	$f_{R,im}$	Resistencia residual a flexión media correspondiente a un CMOD de i mm ($i = 0.5$ mm, 1.5 mm, 2.5 mm y 3.5 mm)
BSC	Competición a ciegas de simulaciones numéricas (<i>Blind Simulation Competition</i>)	R/SFRC	Hormigón reforzado con fibras de acero con armadura convencional (<i>Reinforced/Steel-Fiber Reinforced Concrete</i>)	F_{exp} F_{exp}^*	Carga máxima experimental media Valor de carga experimental en el registro κ
C_S	Programa comercial (<i>Commercial Software</i>)			F_{num}^{max}	Carga máxima numérica
CDP	Modelos de daño plástico para hormigón (<i>Concrete Damage Plasticity</i>)	RPT	Ensayo de placa circular (<i>Round Panel Test</i>)	F_{num}^*	Valor numérico de carga en el registro κ
CMOD	Apertura en la boca de fisura (<i>Crack Mouth Opening Displacement</i>)	SCM	Modelo de fisuras distribuidas (<i>Smearred Crack Model</i>)	n	Número registros
DCM	Modelo de fisura discreta (<i>Discrete Crack Model</i>)	SFRC	Hormigón reforzado con fibras de acero (<i>Steel-Fiber Reinforced Concrete</i>)	$u_{F,max}^{exp}$	Desplazamiento experimental en carga máxima
FEM	Método de los elementos finitos (<i>Finite Element Method</i>)	SLS	Estado limite de servicio (<i>Serviceability Limit State</i>)	$u_{F,max}^{num}$	Desplazamiento numérico en carga máxima
FRC	Hormigón reforzado con fibras (<i>Fiber Reinforced Concrete</i>)	STD	Desviación típica (<i>Standard Deviation</i>)	$\epsilon_{F,max}^{exp}$	Deformación experimental en carga máxima
IA	Análisis inverso (<i>Inverse Analysis</i>)	ULS	Estado limite último (<i>Ultimate Limit State</i>)	$\epsilon_{F,max}^{num}$	Deformación numérica en carga máxima
IH_S	Programa propio (<i>In-House Software</i>)	E_{cm}	Módulo de elasticidad secante en compresión	$\Delta F/F$	Error relativo de la predicción numérica de la carga máxima
LDPM	Modelo de partículas discretas en celosía (<i>Lattice Discrete Particle Model</i>)	Err_F	Error de la predicción numérica de la carga	$\Delta u/u$	Error relativo de la predicción numérica de la deflexión
LVDT	Transductor de desplazamiento (<i>Linear Variable Differential Transformer</i>)	Err_ϵ	Error de la predicción numérica de la deformación	$\Delta \epsilon/\epsilon$	Error relativo de la predicción numérica de la deformación
		f_{cm}	Resistencia a compresión media		
		$f_{t,lm}$	Límite de proporcionalidad a flexión medio		

1. INTRODUCCIÓN

La introducción comprende tres partes: la primera describe el potencial que tiene el refuerzo con fibras en aplicaciones de hormigón estructural; la segunda proporciona una breve descripción de los tipos de modelos basados en el método de elementos finitos (FEM) para el análisis y diseño de estructuras de hormigón reforzado con fibras (FRC); y la tercera contextualiza la competición a ciegas de simulaciones numéricas (BSC) que se describe en este artículo y sus objetivos.

1.1 Refuerzo de fibras para aplicaciones de hormigón estructural

Las investigaciones experimentales y las construcciones emblemáticas muestran el extraordinario potencial de las fibras cortas para el refuerzo de materiales cementicios. Las fibras mejoran significativamente el rendimiento de las estructuras de hormigón (incluyan o no armadura convencional) para las condiciones de diseño en estado límite de servicio (SLS) y en

estado límite último (ULS) [1-6]. En cuanto al SLS, cabe destacar una menor apertura de fisura, un menor nivel de tensiones en las armaduras convencionales y una mayor rigidez de las estructuras de FRC en la fase de post-fisuración. Respecto al ULS, las fibras proporcionan mayor capacidad de carga, modos de fallo más dúctiles, mayor absorción y disipación de energía y mejor integridad estructural en condiciones de carga extremas [3-5]. De aquí en adelante, el acrónimo R/FRC se usará para referirse a una estructura de FRC con armadura convencional. Los mecanismos de resistencia a cortante en el FRC involucran, en interdependencia mutua, al arrancamiento de fibras y al engranaje de áridos, ya que la resistencia a la apertura de fisura ofrecida por las fibras que unen las caras de la fisura aumenta la capacidad de transferencia del esfuerzo cortante debido al efecto de engranaje en los áridos [7,8]. Además, la presencia de los áridos en la fisura sometida a cortante hace que el deslizamiento relativo de las caras también produzca su apertura [9], la cual hace que las fibras se traccionen. La dirección de la fuerza de arrancamiento de las fibras cambia a lo largo de este proceso de apertura y deslizamiento [10], y su magnitud depende de la distribución y geometría de los áridos, y de la distribución y orientación de las fibras. Debido al favorable efecto sinérgico del arrancamiento de fibras y de los mecanismos de resistencia al cortante del engranaje de áridos, el refuerzo con fibras se ha estudiado en profundidad para sustituir total o parcialmente a la armadura transversal convencional [11-18].

El refuerzo con fibras también proporciona mejoras significativas en la durabilidad y en el ciclo de vida de las estructuras de hormigón [19,20]. Las principales aplicaciones del FRC se concentran en pavimentos [21-23], túneles [2-6,24] y prefabricados [25], siendo escasas en sistemas estructurales innovadores, donde los beneficios de los mecanismos de refuerzo de fibras tienen un potencial técnico reconocido, además de ventajas económicas respecto a los sistemas convencionales [1,26,27].

Las fibras, al atravesar fisuras, desarrollan mecanismos de refuerzo por su resistencia al arrancamiento, cuya eficacia depende de las propiedades de los materiales de que estén hechas y de sus características geométricas, así como de las propiedades mecánicas de la pasta de cemento circundante, y de la distribución y orientación de las fibras en el elemento a construir. Estas últimas dependen de la tecnología de fabricación del FRC, de sus propiedades reológicas y de la geometría del elemento a producir [28-31].

1.2 Enfoques numéricos para modelar el comportamiento de las estructuras de FRC

Los beneficios técnicos y económicos del refuerzo con fibras potencian el desarrollo de sistemas estructurales de FRC innovadores y sostenibles. Sin embargo, debido a los complejos fenómenos antes mencionados, su diseño debe hacerse utilizando sofisticados modelos computacionales con aproximaciones que simulen el comportamiento de los materiales constituyentes desde el estado fresco [32] hasta el endurecido [33]. Se han utilizado programas comerciales (C_S) basados en el método de los elementos finitos (FEM) para la simulación del comportamiento no lineal de los materiales en estructuras de FRC, ya que la contribución del refuerzo de fibras se activa, principalmente, después de que aparezcan fisuras. Los

modelos de fisura distribuida y discreta (SCM y DCM, respectivamente) son los más implementados en estos programas para representar el comportamiento de materiales cuasifrágiles [34-43]. Sin embargo, la aplicabilidad de estas aproximaciones se ha evaluado en simulaciones de ensayos experimentales con elementos, en general, a pequeña escala, donde los valores de los parámetros se ajustan al nivel de predicción pretendido, constituyendo, por tanto, una técnica inversa de discutible utilidad en el proyecto de estructuras. Así, la mayoría de estos modelos consideran la contribución de los mecanismos de refuerzo de las fibras a través de una ley tracción-apertura de fisura obtenida de recomendaciones semi-empíricas, o de resultados experimentales, ya sea directamente o por análisis inverso (IA) [44]. Sin embargo, todavía hay una incertidumbre considerable sobre cuál es la metodología más adecuada para obtener los valores de los parámetros del modelo en el análisis de una estructura dada. Una evaluación inadecuada de estos valores proporciona resultados poco o nada representativos del verdadero comportamiento estructural. Los proyectistas son, en general, conscientes de esta realidad, lo que justifica el uso relativamente bajo de herramientas computacionales para explorar las ventajas del FRC en el desarrollo de soluciones de R/FRC competitivas y sostenibles.

Los parámetros en modo I de fractura de los modelos constitutivos en los programas FEM más comunes para el análisis de estructuras de R/FRC se obtienen por análisis inverso, utilizando los datos experimentales determinados en ensayos de flexión en tres puntos de vigas entalladas (3PNBBT) y en ensayos de placas circulares (RPT). El análisis inverso de 3PNBBT se recomienda en estructuras lineales de R/FRC para obtener una relación tracción-apertura de fisura ($\sigma-w$) capaz de reflejar el efecto pared del molde y las propiedades reológicas del FRC en la orientación y distribución de las fibras. Para deducir la relación $\sigma-w$ en el caso de placas y estructuras laminares de R/FRC, se recomienda aplicar el análisis inverso a los resultados obtenidos en RPT, ya que en este ensayo la distribución y orientación de las fibras, así como el mayor número de fisuras de diferente orientación, reflejan mejor el proceso de agrietamiento con respecto a ensayos de 3PNBBT [45]. Sin embargo, la información disponible al respecto muestra que las relaciones $\sigma-w$ deducidas del análisis inverso proporcionan predicciones inseguras [46].

Otro aspecto importante en la simulación de estructuras de FRC es el modo de tratar la dispersión de resultados de ensayos 3PNBBT y RPT en las leyes constitutivas que simulan el FRC. De hecho, debido a la superficie de fractura relativamente más pequeña de estas probetas con respecto a la superficie total de fractura en estructuras R/FRC reales, en especial si son muy hiperestáticas, el número de fibras que contribuyen a tracción en la etapa posterior a la fisuración es mucho menor que en estructuras reales, lo que provoca coeficientes de variación más altos en estos ensayos a pequeña escala. En el contexto de SCM, la transferencia del esfuerzo cortante a través de la fisura generalmente se simula mediante el uso de un factor de retención de cortante, que puede ser un valor constante [47] o función de una serie de valores relacionados con el proceso de apertura/deslizamiento de fisura, el tamaño máximo de árido [48,49] y el refuerzo en la zona de fractura [50]. Alternativamente, también se ha utilizado una ley de ablandamiento para la fisuración por cortante [51,52]. Sin embargo, la determina-

ción de los valores de los parámetros que definen esta ley aún requiere el desarrollo de metodologías experimentales fiables y recomendaciones de diseño.

1.3. BSC y objetivos del presente trabajo

Como se muestra en las secciones anteriores, durante las últimas décadas se han desarrollado modelos analíticos y numéricos para reproducir el comportamiento del FRC. Sin embargo, es necesario un conocimiento profundo de sus limitaciones para evitar resultados poco realistas. Vecchio [53] destacó la necesidad de reducir los posibles errores en el modelado, análisis, e interpretación de los resultados. Por ejemplo, los resultados de un concurso internacional sobre paneles de hormigón armado demostraron que la resistencia máxima y las deformaciones calculadas fueron mucho más altas que las experimentales [54]. Por lo tanto, una BSC brinda la oportunidad de comparar los resultados obtenidos por diferentes métodos e identificar potencialidades y debilidades de los modelos. Recientemente, se han realizado algunas bases de datos con vigas de R/FRC que fallan a cortante [55–57] con el objetivo de ser una herramienta útil y fiable para evaluar la predicción de formulaciones analíticas y guías de diseño. Sin embargo, estas bases de datos, en general, no incluyen información fundamental para la evaluación de modelos más sofisticados, basados en el FEM, que son cada vez más usados en el proyecto de estructuras. Para evaluar la capacidad predictiva de este tipo de modelos, se debe disponer de información adicional como la respuesta deformacional, el patrón de fisuración y los campos de deformaciones y tensiones en los materiales constituyentes. Este es el principal objetivo de la BSC promovida por el grupo de trabajo *fib* WG 2.4.1 – *Modeling of FRC Structures*. De este modo, esta BSC contribuye a la valoración de los programas existentes basados en el FEM para la predicción del comportamiento de vigas R/SFRC que fallan a cortante. El presente artículo ofrece una descripción de esta BSC, incluyendo el programa experimental, el proceso de evaluación y clasificación de soluciones presentadas, y proporciona observaciones preliminares basadas en la información obtenida. Es importante destacar que la intención no es discutir en profundidad las potencialidades y debilidades de los modelos utilizados por los participantes, ya que esto requeriría su colaboración directa para hacer simulaciones adicionales que permitieran extraer conclusiones fiables y de utilidad en el proyecto de estructuras.

2.

NORMAS DE LA COMPETICIÓN E INFORMACIÓN SUMINISTRADA A LOS PARTICIPANTES

2.1 Reglas de la competición

La competición a ciegas de simulaciones numéricas se anunció a finales del año 2019. Las bases del concurso incluían información sobre su objetivo, la geometría de las probetas, los materiales, el procedimiento de ensayo, el informe a elaborar por los participantes, los criterios para seleccionar la mejor predicción de los modelos y los plazos para la presentación de la propuesta.

El objetivo principal era obtener información sobre los modelos que habitualmente se utilizan en la simulación del comportamiento de estructuras de hormigón reforzado con fibras. Para ello, se planteó el análisis de la respuesta de una viga en T sometida a flexión asimétrica en tres puntos hasta rotura. Las curvas numéricas carga-deflexión y deformación del hormigón (a nivel de la armadura longitudinal)-deflexión, medidas en la sección cargada, se compararon con las obtenidas en los ensayos experimentales.

La probeta era una viga de hormigón reforzado con fibras de acero, de sección transversal en T con armadura longitudinal convencional (R/SFRC) y sin cercos en el vano de cortante crítico, como se detalla en la Sección 2.2.1.

Las propiedades de los materiales del SFRC se determinaron a los 7 y 14 días utilizando ensayos normalizados [58]. Los valores de dichas propiedades se indican en la Sección 2.2.2. Dichos valores estuvieron disponibles para los participantes desde la última semana de enero hasta la primera de febrero del 2020.

El procedimiento de ensayo consistió en someter a dos vigas gemelas a sendas cargas excéntricas en control de desplazamiento, llevándolas hasta rotura. Los detalles se pueden encontrar en la Sección 3.1. Los participantes tuvieron que simular estos ensayos utilizando modelos numéricos, proporcionando las curvas carga-deflexión y deformación-deflexión obtenidas en sus simulaciones.

Las propuestas se enviaron hasta las 23:59 h (hora de España) del 29 de febrero del 2020 a la secretaria del *fib* WG 2.4.2. Los informes de los participantes debían incluir los siguientes elementos:

- Un documento, limitado a cuatro páginas y con un formato específico, con la descripción de los aspectos fundamentales del modelo utilizado en la simulación.
- Una tabla en formato .xls con los resultados de las simulaciones en tres columnas: una para la deflexión, otra para la carga y una tercera para la deformación, obtenidas cada 0.1 mm de deflexión.
- Un archivo de imagen (en formato .jpeg o .pdf) del patrón de fisuración obtenido en carga máxima.

Una vez recibidas las predicciones de los participantes, se ensayaron a flexión en tres puntos las dos vigas de R/SFRC idénticas, hasta el fallo por cortante, con el fin de obtener la respuesta experimental y compararla con los resultados simulados. Los ensayos se realizaron en el Laboratorio *Structural Division* del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Miño (LEST), el 9 de marzo de 2020, coincidiendo con la décima reunión del *fib* WG 2.4.2. Los ensayos se transmitieron en directo a través de un canal de YouTube (primer ensayo: <https://youtu.be/1WssVtSx3eI>, segundo ensayo: <https://youtu.be/8AM5ehch0EA>).

Para seleccionar la mejor simulación, se consideraron las curvas carga-deflexión y deformación-deflexión, así como la capacidad de predecir la carga máxima, y la deflexión y deformación correspondientes. El criterio para calcular la precisión de una simulación se detalla en la Sección 4.1, concretando además que la calidad de la predicción del patrón de fisuración se consideraría solo en el caso de empate entre participantes. Las conclusiones fueron comunicadas a los participantes a mediados de abril de 2020. Se les envió un informe con los

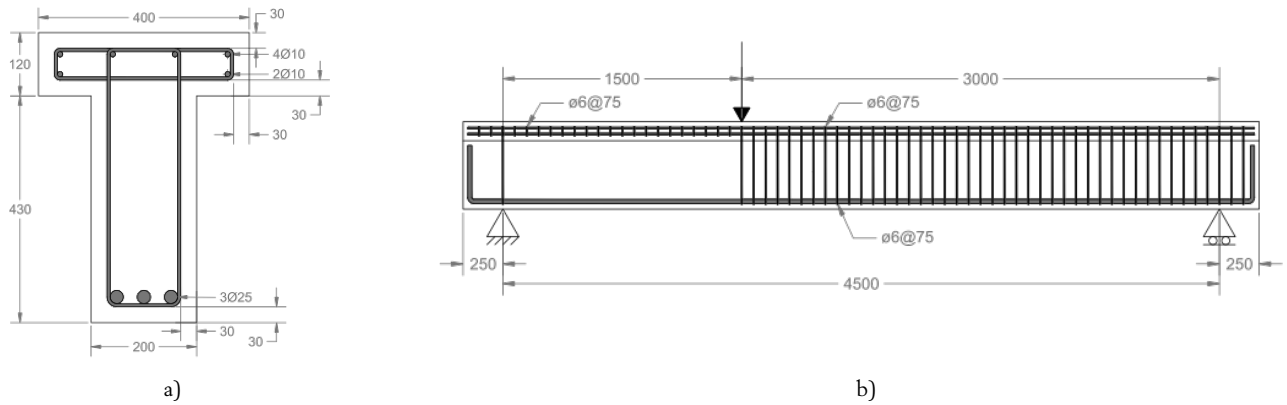


Figura 1. Geometría de la viga: (a) sección transversal, y (b) vista longitudinal (dimensiones en mm).

resultados más importantes y un archivo con los registros experimentales de deflexión, carga y deformación. Para la comparación de resultados y para un análisis preliminar de las simulaciones obtenidas, ver Secciones 4 y 5.

2.2 Información proporcionada a los participantes

2.2.1 Geometría de las vigas, condiciones de apoyo y carga

La figura 1 muestra un esquema de la geometría de la probeta, de los apoyos y las condiciones de carga. Es una viga en T reforzada con barras longitudinales en la parte inferior del alma y en la cabeza. Se dispusieron cercos en el vano de cortante más largo, en toda la longitud de la cabeza y en la zona de los apoyos, como se representa en la figura 1. Se adoptó un recubrimiento de 30 mm. Se aplicó una carga excéntrica de flexión en tres puntos, dividiendo así la probeta en dos vanos de cortante de diferente longitud.

2.2.2 Dosificación del SFRC y propiedades

La dosificación del SFRC fue realizada por la empresa CiviTest (www.civitest.pt). El SFRC fue suministrado por la empresa Unibetão, encargado por la empresa Casais (www.casais.pt) que produjo las dos vigas gemelas. La composición del SFRC se indica en la tabla 1. Se trata de un hormigón C50/60 XD3 (P) CL 0.20 D_{max} 12.5 S5, con un cemento tipo CEM II/AL 42.5R de endurecimiento rápido de 58.8 MPa y 67.1 MPa a 7 y 28 días, respectivamente.

TABLA 1. Composición del SFRC

Áridos (kg/m ³)				CEM (kg/m ³)	Áridos		Relación w/c [-]	Cf (kg/m ³)
CA	FA	CS	FS		P	SP		
631	145	622	306	450	4.5	5.4	0.4	60

Leyenda: CA - Árido grueso 6/14, FA - Árido fino 4/8, CS - Arena gruesa, FS - Arena fina, CEM - Cemento, P - Plastificante, SP - Superplastificante, w/c - relación agua/cemento, Cf - Contenido de fibras

Se utilizaron fibras de acero con extremos conformados en gancho de 33 mm de longitud, 0.55 mm de diámetro y re-

sistencia a tracción superior a 1100 MPa (información proporcionada por el proveedor de las fibras). La densidad del SFRC a los 7 y 14 días fue, respectivamente, de 2376 y 2400 kg/m³. Las propiedades del SFRC a compresión se evaluaron a los 7 y 14 días. Se ensayaron cuatro probetas cilíndricas a cada edad para evaluar el módulo de elasticidad secante a compresión y la resistencia a compresión. Los resultados se indican en la tabla 2 (media y desviación típica). La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad secante en compresión se determinaron, respectivamente, de acuerdo con las normas NP EN 12390-3: 2011 [59] y NP EN 12390-13: 2014 [60]. Las propiedades del SFRC a flexión también se midieron a los 7 y 14 días. Se llevaron a cabo ensayos de flexión en tres puntos con vigas entalladas (seis probetas a los 7 días y cuatro a los 14 días) de acuerdo con las recomendaciones del *fib Model Code* 2010 [58] para la evaluación de las resistencias residuales a flexión ($f_{R,1}$, $f_{R,2}$, $f_{R,3}$ y $f_{R,4}$, que corresponden a aperturas de la boca de la fisura, CMOD, de 0.5, 1.5, 2.5 y 3.5 mm, respectivamente). La figura 2 muestra un esquema de los ensayos de flexión. Los resultados se incluyen en tabla 2. Las curvas carga-apertura de la boca de la fisura (F-CMOD) se muestran en la figura 3.

TABLA 2.

Propiedades del SFRC a los 7 y 14 días de edad: valores medios de: resistencia a compresión (f_{cm}); módulo de elasticidad secante en compresión (E_{cm}); límite de proporcionalidad a flexión ($f_{t,lm}$) y resistencias residuales a flexión ($f_{R,i}$ $i=1$ to 4) [desviaciones típicas, en la misma unidad que la media correspondiente].

	Propiedad	a 7 días	a 14 días
Compresión	f_{cm} (MPa)	56.9 [0.7]	64.2 [1.5]
	E_{cm} (GPa)	30.3 [0.7]	32.9 [0.4]
Flexión	$f_{t,lm}$ (MPa)	5.63 [0.29]	5.57 [0.16]
	$f_{R,1m}$ (MPa)	4.76 [0.94]	4.79 [0.70]
	$f_{R,2m}$ (MPa)	4.67 [0.84]	4.21 [0.56]
	$f_{R,3m}$ (MPa)	3.49 [0.74]	3.16 [0.52]
	$f_{R,4m}$ (MPa)	2.80 [0.57]	2.49 [0.41]

Las propiedades de las barras de acero de los tres diámetros utilizados se muestran en la Tabla 3. El límite elástico y la resistencia a tracción se midieron según la norma NP EN ISO 6892-1: 2016 [61].

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Configuración de ensayos y sistema de monitorización

Cada una de las dos vigas gemelas fue sometida a una carga excéntrica en control de desplazamiento a 50 $\mu\text{m/s}$ en la sección cargada, hasta rotura. Durante los ensayos se midieron la carga, la deflexión (desplazamiento vertical de la sección transversal en la que se aplica la carga), y la deformación del hormigón al nivel del refuerzo longitudinal en la sección cargada (ver figura 4). La deformación se determinó dividiendo el desplazamiento medido por un transductor de desplazamiento (LVDT) por su base de medida (100 mm). Para medir la deflexión de la viga, otro LVDT se apoyó en un sistema de yugo japonés (ver figura 4) para excluir los valores parásitos registrados por dicho transductor.

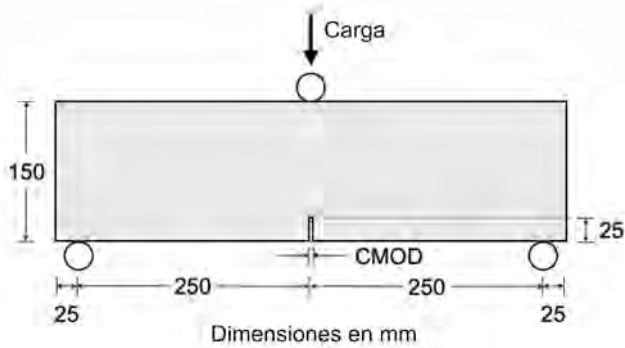


Figura 2. Localización de la apertura de la boca de la fisura (CMOD) en los ensayos de flexión en tres puntos de vigas entalladas.

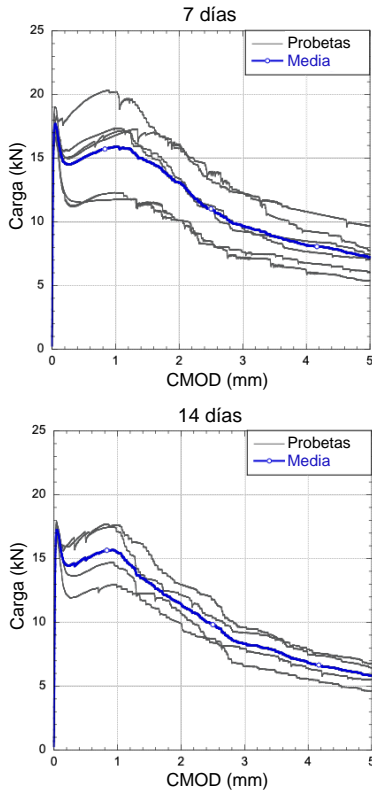


Figura 3. Relaciones carga-apertura de la boca de la fisura (CMOD) en ensayos de flexión en tres puntos de vigas entalladas ensayadas a 7 días (arriba) y 14 días (abajo).

TABLA 3.

Límite elástico y resistencia a tracción de las barras de acero para cada uno de los tres diámetros utilizados [desviación típica].

Diámetro (mm)	Límite elástico (MPa)	Resistencia a tracción (MPa)
6	527 [11]	700 [16]
10	538 [7]	696 [6]
25	557 [2]	678 [1]

3.2 Resultados

La figura 5 muestra los resultados experimentales. Desafortunadamente, se perdió el registro de la deformación de la primera viga. La figura 6 muestra los patrones de fisuración de ambas vigas tras su fallo por cortante.

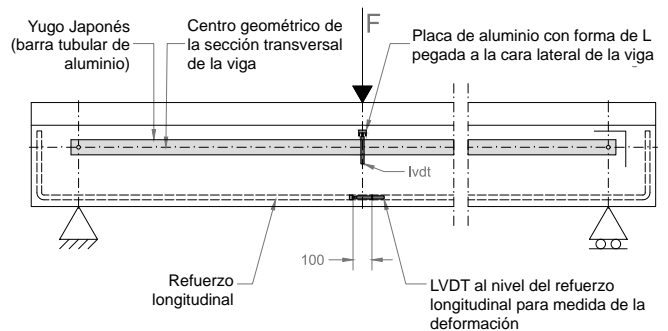


Figura 4. Croquis de las medidas de deflexión y deformación de la viga (dimensiones en mm).

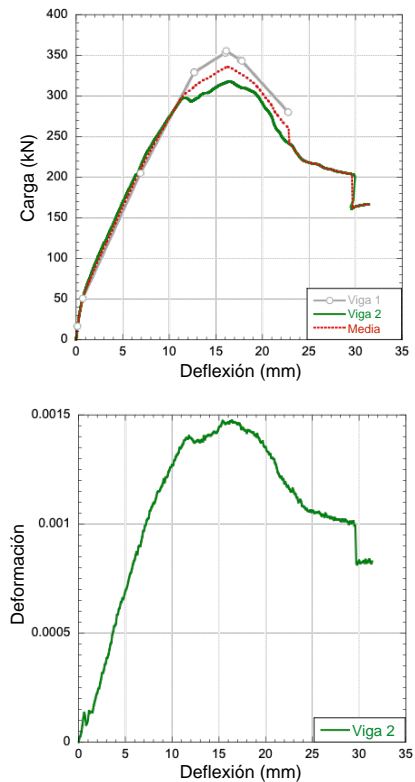


Figura 5. Resultados experimentales: curvas promedio carga-deflexión (arriba); y deformación-deflexión (abajo).

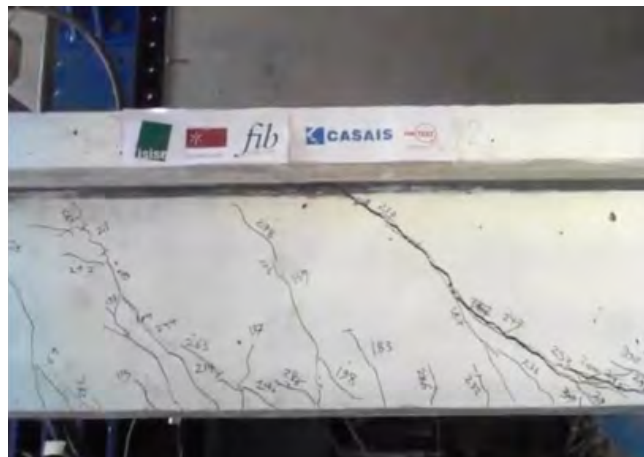
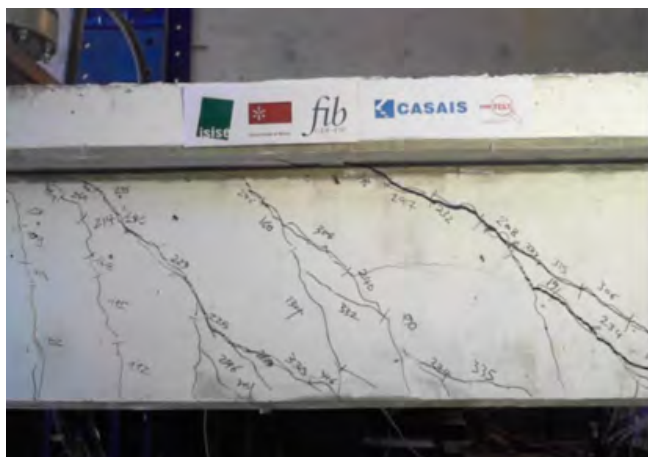


Figura 6. Patrones de fisuración de las vigas en el vano de cortante corto: viga 1 (izquierda); y 2 (derecha).

4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

4.1 Criterio para la evaluación de una simulación

El nivel predictivo de cada simulación se calculó tras realizar los ensayos, de acuerdo con la siguiente metodología:

1. Se calcularon el promedio de la carga y de la deformación experimentales en cada registro a partir de los resultados de las dos vigas.
2. Los resultados numéricos de cada participante se compararon con el promedio experimental, hasta el pico de carga. Si la simulación termina antes de la carga máxima experimental, se asume una fractura frágil (por lo tanto, se consideran valores nulos desde el pico numérico hasta el desplazamiento correspondiente a la carga máxima).
3. El error Err_F de la predicción numérica de la carga se calculó como:

$$Err_F = \frac{1}{n} \sum_{\kappa} \frac{|F_{\text{exp}}^{\kappa} - F_{\text{num}}^{\kappa}|}{F_{\text{exp}}^{\kappa}} \quad (1)$$

donde κ corresponde al ordinal del registro, F_{exp}^{κ} y F_{num}^{κ} son los valores experimentales y numéricos de carga para el registro κ , respectivamente, y n es el número total de lecturas. Se utilizó una ecuación análoga para calcular el error de la deformación Err_{ϵ} .

4. El error relativo de la carga máxima numérica $\Delta F/F$ se calculó como:

$$\Delta F/F = \frac{|F_{\text{exp}}^{\text{max}} - F_{\text{num}}^{\text{max}}|}{F_{\text{exp}}^{\text{max}}} \quad (2)$$

donde $F_{\text{exp}}^{\text{max}}$ es la carga máxima del promedio de ensayos y $F_{\text{num}}^{\text{max}}$ la carga máxima de la predicción numérica. Para calcular el error relativo de la deformación, $\Delta \epsilon/\epsilon$, se ha utilizado una expresión semejante, considerando la deformación correspondiente a la carga máxima de los ensayos, $\epsilon_{F_{\text{exp}}^{\text{max}}}$, y la deformación correspondiente a la carga máxima de la predicción numérica, $\epsilon_{F_{\text{num}}^{\text{max}}}$, y análogamente, para el error relativo de la deflexión, $\Delta u/u$, los correspondientes $u_{F_{\text{exp}}^{\text{max}}}$ y $u_{F_{\text{num}}^{\text{max}}}$.

5. La puntuación de cada participante se calculó considerando el error de las curvas numéricas con respecto al

promedio de los ensayos y los errores relativos de la carga máxima, deformación y deflexión correspondientes a la carga máxima, según la siguiente expresión:

$$\text{Puntuación} = 0.35 \frac{\Delta F}{F} + 0.15 Err_F + 0.25 \frac{\Delta \epsilon}{\epsilon} + 0.1 Err_{\epsilon} + 0.15 \frac{\Delta u}{u} \quad (3)$$

Nótese que cuanto mejor sea la simulación, menor puntuación obtiene. La simulación perfecta tiene una puntuación nula.

4.2 Puntuaciones de las simulaciones numéricas de los participantes

Se recibieron un total de 37 propuestas de 36 participantes; uno de ellos presentó dos propuestas. El [apéndice B](#) detalla la lista de participantes.

A continuación, se atribuye una designación aleatoria P_i para hacer referencia a un participante genérico i , con $i = 1$ a 36, en aras de la confidencialidad.

La [tabla 4](#) incluye las predicciones y puntuaciones de las simulaciones de los 36 participantes. Los dos modelos presentados por uno de los participantes se identifican añadiendo las letras a y b a la identificación P_i correspondiente (es decir, al número 12). También se muestra el tipo de modelo y la clase de programa, que se analizarán en la [sección 5](#). Para ello, los tipos de modelos indicados en las propuestas se agruparon en los siguientes conjuntos: SCM, ya sea un enfoque de fisuración fijo, multidireccional fijo, o rotativo, formulados en deformaciones totales o incrementales; DCM, independientemente de estar basados en conceptos de discontinuidades fuertes embebidas, o de usar elementos finitos de intercara en el contorno de elementos finitos regulares; modelos de daño plástico para hormigón (CDP); modelos de partículas discretas en celosía (LDPM); y otros modelos, basados en enfoques momento-rotación, partición de la unidad, cuerpo rígido-muelle y tres-fases.

En cuanto a la clase de programa utilizado en las simulaciones, se clasificaron en dos grupos: propio (IH_S); y comercial (C_S).

La [figura 7](#) representa las puntuaciones de los participantes. Las de los participantes 13 y 34 han sido excluidas del gráfico, por estar fuera del rango de resultados del resto de participantes.

TABLA 4.

Capacidad predictiva de las simulaciones numéricas presentadas por los participantes (mostradas en orden aleatorio).

P _i	$\Delta F/F$ (%)	Err _F (%)	$\Delta \epsilon/\epsilon$ (%)	Err _{ϵ} (%)	$\Delta u/u$ (%)	Puntuación (%)	Clasificación	Clase de modelo	Tipo de programa
1	16.12	59.71	22.70	86.05	47.83	36.05	6	SCM	C_S
2	14.34	62.43	18.60	83.45	49.69	34.83	5	SCM	IH_S
3	18.09	34.06	84.04	77.77	16.15	42.65	10	CDP	C_S
4	51.88	44.91	2486	60.18	356.5	705.8	32	CDP	C_S
5	4.417	9.356	201.8	260.9	3.106	79.96	21	CDP	C_S
6	7.973	89.26	12.45	122.3	69.57	41.96	9	SCM	IH_S
7	41.93	27.09	1824	78.23	136.0	503.0	31	SCM	C_S
8	32.99	77.10	41.78	54.37	18.63	41.79	8	Otros	IH_S
9	42.55	89.62	86.10	102.7	38.51	65.90	17	SCM	C_S
10	1.270	6.135	33.56	23.50	4.348	12.76	1	SCM	IH_S
11	83.12	122.0	129.9	59.78	57.76	94.52	24	CDP	C_S
12a	53.73	35.02	1562	70.48	223.0	455.1	29	CDP	C_S
12b	34.85	32.26	182.9	80.08	0.000	70.76	19	SCM	C_S
13	60.80	29.14	1.659e+5	2.020e+4	241.0	4.355e+4	36	SCM	C_S
14	70.55	23.65	2376	136.3	831.7	760.7	34	DCM	IH_S
15	8.847	53.34	28.99	64.63	23.60	28.35	2	SCM	IH_S
16	13.48	42.25	43.63	57.98	24.84	31.49	3	CDP	C_S
17	42.22	46.37	92.66	75.46	147.8	74.62	20	CDP	C_S
18	11.68	21.01	109.7	66.46	23.60	44.86	11	LDPM	IH_S
19	42.66	22.38	112.1	29.47	40.37	55.31	14	Otros	IH_S
20	32.98	29.90	226.9	87.49	6.211	82.44	22	SCM	C_S
21	9.844	27.78	95.48	138.6	18.01	48.04	13	DCM	IH_S
22	28.74	105.5	89.36	90.55	78.88	69.11	18	CDP	C_S
23	49.19	52.64	93.35	64.81	20.50	58.01	15	SCM	C_S
24	30.44	14.41	332.8	64.10	24.84	106.2	26	SCM	C_S
25	66.59	45.88	56.46	59.22	72.05	61.03	16	CDP	C_S
26	30.34	48.69	49.33	43.07	23.60	38.10	7	SCM	C_S
27	46.45	38.31	1199	86.52	86.34	343.5	27	SCM	C_S
28	35.35	31.33	1464	121.5	30.43	399.7	28	SCM	C_S
29	53.46	58.72	167.1	135.8	9.317	84.27	23	CDP	C_S
30	41.35	16.64	4040	834.3	167.1	1135	35	SCM	IH_S
31	78.28	30.08	2498	517.3	215.5	740.5	33	Otros	IH_S
32	39.16	24.89	90.62	54.91	10.56	47.17	12	DCM	IH_S
33	13.12	7.442	81.23	54.63	3.106	31.95	4	SCM	IH_S
34	42.87	27.05	1.955e+9	1.622e+8	346.6	5.049e+8	37	Otros	IH_S
35	147.5	168.4	966.5	32.34	983.9	469.3	30	CDP	C_S
36	98.55	99.73	97.34	104.9	99.38	99.18	25	LDPM	IH_S

La figura 8 muestra las curvas promedio experimentales, las predicciones numéricas individuales y las envolventes de las curvas numéricas carga-deflexión y deformación-deflexión. Los resultados se muestran hasta la deflexión correspondiente al final de los ensayos. Las curvas de deformación-deflexión de los participantes 13 y 34 se han excluido del gráfico, ya que están fuera del rango del resto de resultados.

La figura 9 muestra los resultados de los participantes clasificados en las tres primeras posiciones. Las curvas numéricas y experimentales promediadas carga-deflexión y deformación-deflexión se muestran en la parte izquierda de estas figuras, mientras que el patrón de fisuras obtenido en carga máxima se muestra en la parte derecha. Se omite cualquier referencia al programa de cálculo utilizado para guardar la confidencialidad.

Las curvas carga-deflexión-deformación y el patrón de fisuras predicho por la simulación de cada participante se presentan en el apéndice A.

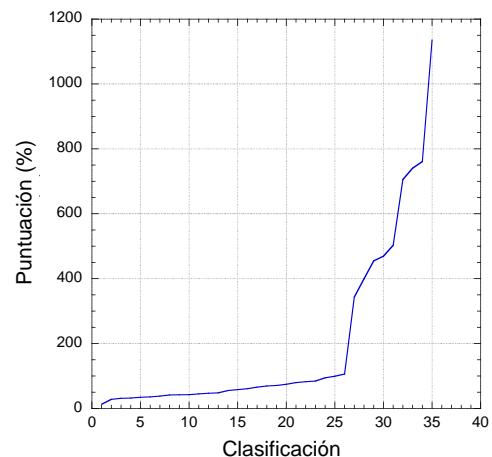


Figura 7. Puntuación de los participantes.

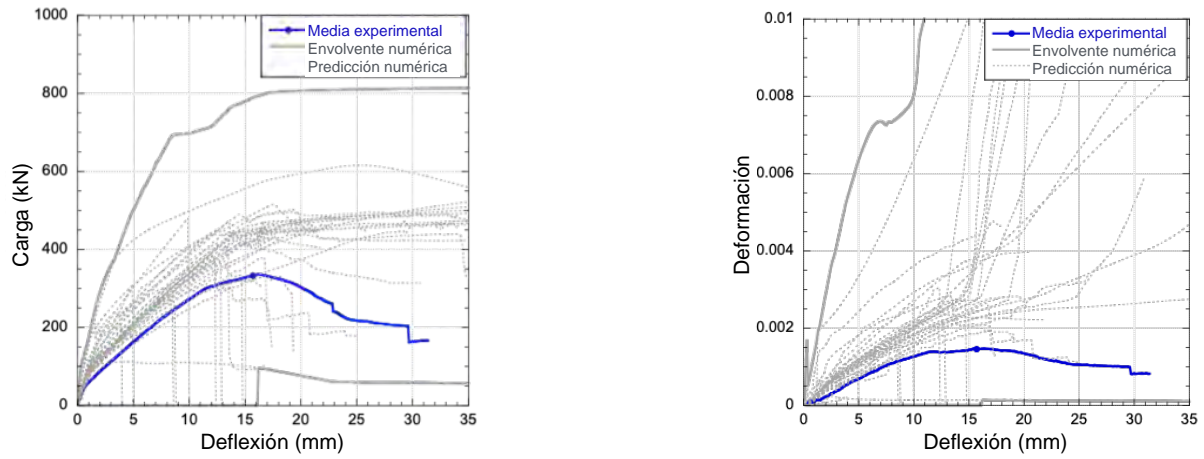


Figura 8. Resultados experimentales, envolventes numéricas y curvas numéricas carga-deflexión (izquierda) y deformación-deflexión (derecha).

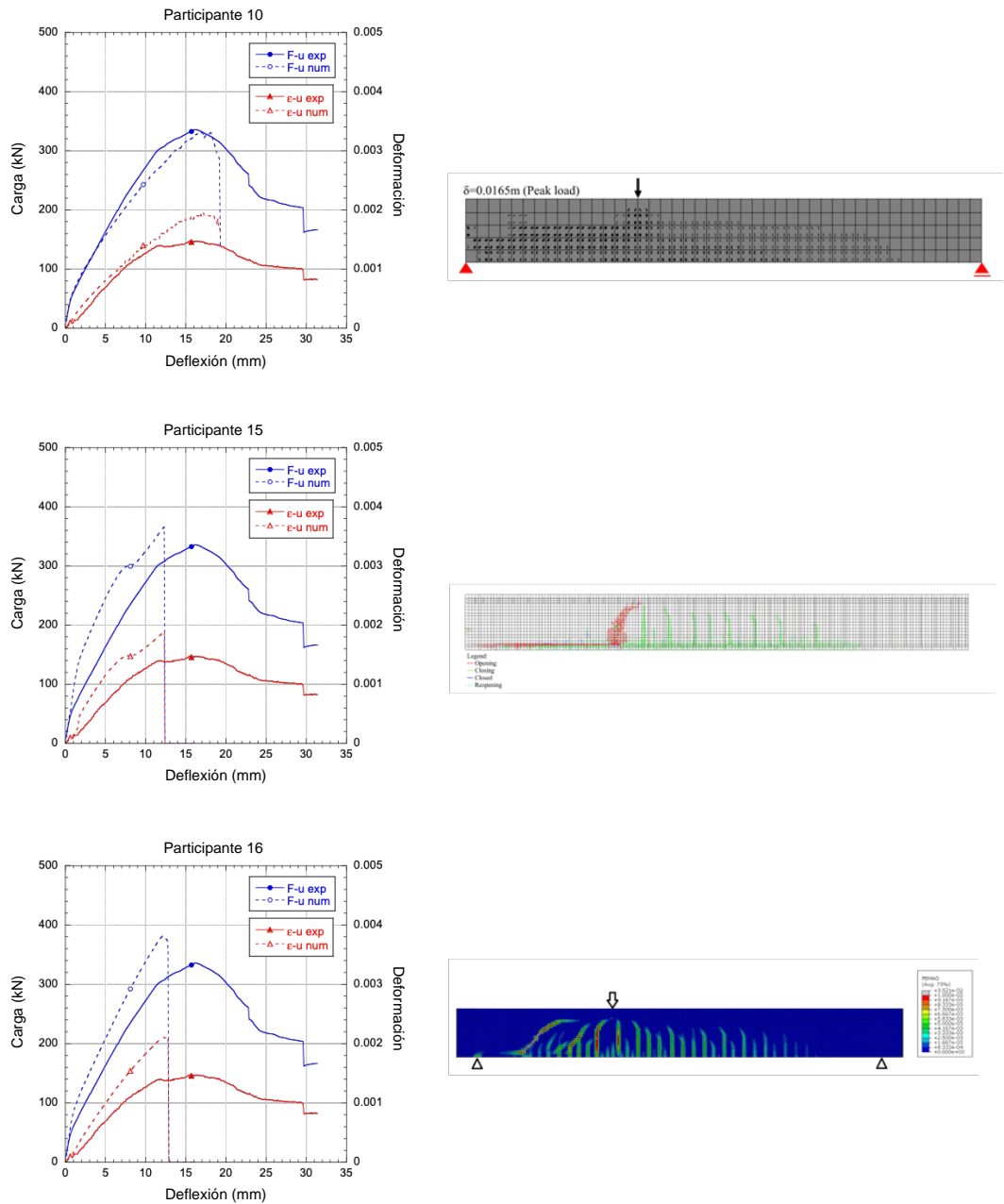


Figura 9. Resultados de los participantes clasificados en las tres primeras posiciones, correspondientes a las propuestas 10, 15 y 16.

5. ANÁLISIS PRELIMINAR DE LAS SIMULACIONES RECIBIDAS

Según el criterio adoptado para agrupar los tipos de modelos, indicado en la [sección 4.2](#), con la información proporcionada en la [tabla 4](#), se identifican cinco clases de modelos a partir de las propuestas de los participantes, seguido de sus porcentajes:

- Modelos de fisura distribuida (SCM): 17 propuestas (46.0%).
- Modelos de fisura discreta (DCM): 3 propuestas (8.1%).
- Modelos de plasticidad de daño del hormigón (CDP): 11 propuestas (29.7%).
- Modelos de partículas discretas de celosía (LDPM): 2 propuestas (5.4%).
- Otros: 4 propuestas (10.8%).

La [figura 10](#) muestra la puntuación (media y desviación típica) por tipo de modelo. Recuerdese que cuanto menor es la puntuación, mejor es la predicción de la simulación. Los resultados obtenidos por los participantes 13 y 34 han sido excluidos del análisis por estar fuera del rango de resultados del resto de participantes, como ya se ha explicado en el [apartado 4.2](#).

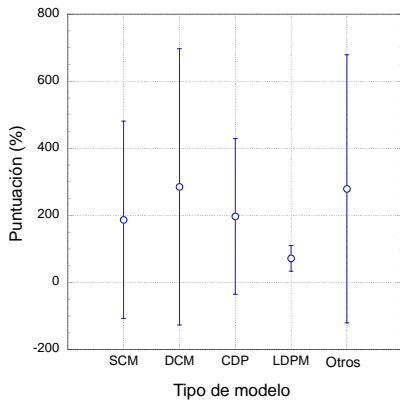


Figura 10. Puntuación por tipo de modelo, donde SCM, DCM, CDP y LDPM se refieren, respectivamente, a modelos de fisura distribuida, de fisura discreta, de daño plástico y de partículas discretas en celosía.

Según el criterio adoptado para agrupar los tipos de programas utilizados en las simulaciones (ver [sección 4.2](#)), 22 propuestas (59.5%) adoptaron C_S y 15 propuestas (40.5%) IH_S. La [figura 11](#) muestra la puntuación por clase de programa.

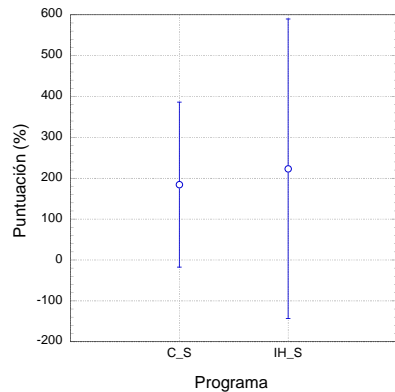


Figura 11. Puntuación por clase de programa, donde C_S y IH_S se refieren, respectivamente, a programa comercial y propio.

Por último, la predicción de cada elemento de la ecuación de puntuación (3) ($\Delta F/F$, Err_F , $\Delta \epsilon/\epsilon$, Err_ϵ , $\Delta u/u$) se compara por tipo de modelo, considerando la precisión de cada modelo en la predicción:

Err_F : carga de la viga hasta su valor máximo;

Err_ϵ : deformación de la viga hasta su carga máxima;

$\Delta F/F$: carga máxima de la viga;

$\Delta u/u$: deflexión de la viga en carga máxima;

$\Delta \epsilon/\epsilon$: deformación del hormigón en carga máxima en la zona seleccionada.

Las [figuras 12 a 14](#) muestran los resultados obtenidos.

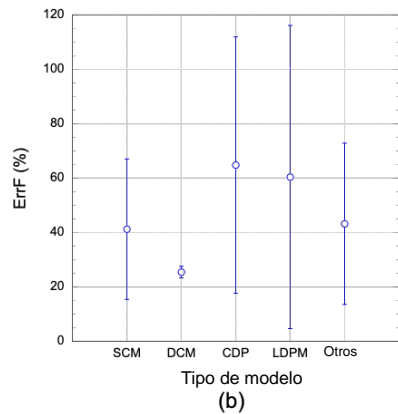
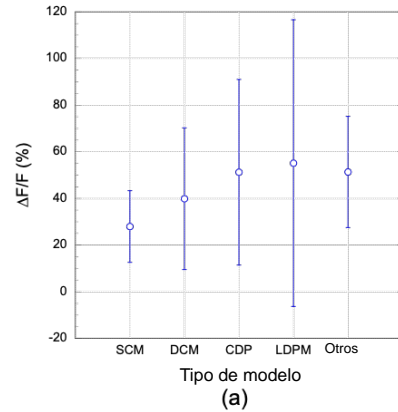
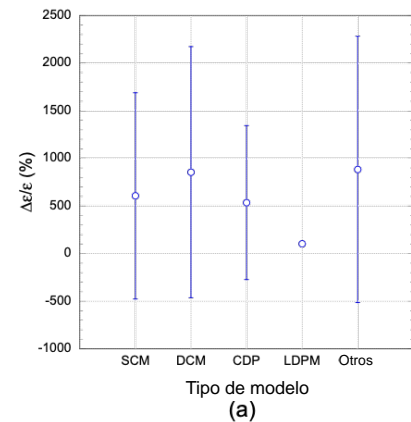


Figura 12. Capacidad predictiva por tipo de modelo en términos de: error relativo de la carga máxima $\Delta F/F$ (a) y error de la carga Err_F (b).



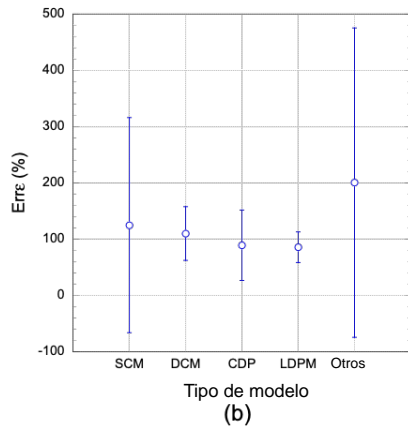


Figura 13. Capacidad predictiva por tipo de modelo en términos de: error relativo de la deformación en carga máxima $\Delta\epsilon/\epsilon$ (a); y error de la deformación Err_{ϵ} (b).

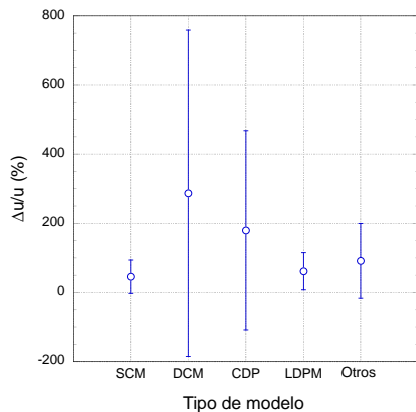


Figura 14. Capacidad predictiva por tipo de modelo en términos del error relativo de la deflexión en carga máxima $\Delta u/u$.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se han presentado los resultados más relevantes del concurso de simulación a ciegas organizado por el *fib* WG 2.4.2, y se ha hecho una primera evaluación de la predicción de los modelos constitutivos basados en FEM disponibles para la simulación del fallo a cortante de vigas de hormigón reforzado con fibras a escala real. Se pueden destacar los siguientes puntos:

- 1) Aunque los dos equipos participantes que han quedado primero y segundo han utilizado modelos de fisura distribuida (SCM), la dispersión en las predicciones con esta clase de modelos fue muy alta, solo superada por los de fisura discreta (DCM) y por la clase designada como "otros", que incluye modelos momento-rotación, partición-de-unidad, cuerpo rígido-muelle y de tres fases.
- 2) En términos de predicción promedio, la clasificación fue, de mejor a peor: LDPM, SCM, CDP, "otros" y DCM.
- 3) La capacidad predictiva de las propuestas que utilizaron programas comerciales fue mejor y con menor dispersión que las que utilizaron códigos propios.
- 4) La capacidad predictiva también se evaluó en términos de: carga de la viga hasta su valor máximo (Err_F),

deformación hasta carga máxima (Err_{ϵ}), carga máxima ($\Delta F/F$), deflexión en carga máxima ($\Delta u/u$) y deformación del hormigón en carga máxima en la zona seleccionada ($\Delta\epsilon/\epsilon$). El SCM hizo las mejores predicciones en términos de $\Delta F/F$ y $\Delta u/u$ (pero casi iguales a las obtenidas por el LDPM para este último indicador); el DCM fue el mejor en términos de Err_F ; el LDPM destacó en términos de $\Delta\epsilon/\epsilon$ y Err_{ϵ} , pero sus predicciones no fueron muy diferentes a las de CDP para este último indicador.

- 5) El patrón de fisuración de las simulaciones de los participantes en las posiciones segunda y tercera corresponden claramente a un fallo por cortante, lo cual no es evidente en el patrón del participante que ha quedado en primera posición.

Cabe señalar que los indicadores de predicción no deben dissociarse del número de propuestas por cada clase de modelos ni de la experiencia de los participantes ya que, en algunos casos, éstos tienen participación, directa o indirecta, en el desarrollo del programa que utilizan.

Los autores de este artículo quieren realizar un análisis más profundo de las propuestas recibidas, con el objetivo de captar las fortalezas y debilidades de los modelos constitutivos utilizados para el tipo de estructura analizada, y de proporcionar información útil para los proyectistas que utilizan los tipos de modelos adoptados en esta BSC. Se invitará a los participantes con mejor capacidad predictiva en las clases de modelos más utilizados a colaborar con los autores en las actividades indicadas. Además, el *fib* WG 2.4.1 busca dar continuidad a este tipo de BSC, ya que es una metodología fiable para recopilar programas experimentales exhaustivos y para la evaluación de la capacidad predictiva de modelos constitutivos disponibles y futuros.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por FCT a través del proyecto ICoSyTec, referencia PTDC/ECICON/27990/2017, y PGC2018-097116-A-I00 (MCIU/AEI/FEDER, UE). Además, expresan su agradecimiento a las empresas Casais, para la producción de las vigas, y CiviTest, para la ejecución de las probetas y los ensayos experimentales de caracterización de las propiedades mecánicas del SFRC y de las armaduras convencionales de la BSC. Por último, pero no menos importante, agradecen el apoyo de la *fib* en la difusión de la BSC.

Referencias

1. Mobasher, B.; Barros, J.A.O.; Naaman, A.E.; Destree, X.; et al. 2015. Report on design and construction of steel fiber-reinforced concrete elevated slabs, ACI 544.6R-15, Reported by ACI Committee 544.
2. Bentur, A.; Mindess, S., 2007. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 2nd edition, Francis & Taylor, UK.
3. Craig, R. 2006. Malmo's constructions starts, *Tunneling & Trenchless Construction*, 12-14.
4. Craig, R. 2004. Dartford cable tunnel, *Tunneling & Trenchless Construction*, 17-19.
5. Gambarova, P. 2004. Overview of Recent Advancements in FRC Knowledge and Applications with Specific Reference to High Temperature. *Proceedings, RILEM Technical Meeting*, pp. 125-140.

6. Balaguru, P.N.; Shah, S.P., 1992. *Fiber reinforced cement composites*, McGraw-Hill International Editions, Civil Engineering Series.
7. Kaufmann W, Amin A, Beck A, Lee M., 2019, Shear transfer across cracks in steel fibre reinforced concrete. *Eng Struct.*;186: 508–524. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.02.027>
8. Matos LMP, Barros JAO, Ventura-Gouveia A, Calçada R. 2020. Constitutive model for fibre reinforced concrete by coupling the fibre and aggregate interlock resisting mechanisms. *Cem Concr Compos J.*;111:103618. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.1036>.
9. Cavagnis F, Ruiz MF, Muttoni A. 2015. Shear failures in reinforced concrete members without transverse reinforcement: An analysis of the critical shear crack development on the basis of test results. *Eng Struct.*;103:157–173. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.09.015>.
10. Foster, S.J.; Lee, G.G.; Htut, T.N.S. 2007, Radiographic imaging for the observation of modes I and II fracture in fibre reinforced concrete *Paper presented at: The 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, p.8. URL <https://framcos.org/FraM-CoS-6/410.pdf>
11. Jang S-J, Jeong G-Y, Yun H-D. 2018. Use of steel fibers as transverse reinforcement in diagonally reinforced coupling beams with normal- and high-strength concrete. *Construct Build Mater.* ISSN 09500618;187:1020–1030. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.063>.
12. Adebar P, Mindess S, St-Pierre D, Olund B. 1997. Shear tests of fiber concrete beams without stirrups. *ACI Struct J.*;94(1):68–76.
13. Kwak Y-K, Eberhard MO, Kim W-S, Kim J. 2002, Shear strength of steel fiber-reinforced concrete beams without stirrups. *ACI Struct J.*;99(4):530–538.
14. Minelli F, Plizzari GA, Vecchio FJ., 2007, *Influence of steel fibers on full-scale RC beams under shear loading*. In: Carpinteri A, Gambarova PG, Ferro G, Plizzari GA, editors. *Fracture mechanics of concrete structures—High performance concrete, brick-masonry and environmental aspects*. London: Taylor and Francis; p. 1523–1531.
15. Aoude H, Belghiti M, Cook WD, Mitchell D., 2012, Response of steel fiber-reinforced concrete beams with and without stirrups. *ACI Struct J.*;109(3):359–368.
16. Conforti A, Minelli F, Plizzari GA., 2013, Wide-shallow beams with and without steel fibres: A peculiar behaviour in shear and flexure. *Compos Part B Eng.*;51:282–290.
17. Singh B, Jain K., 2014, Appraisal of steel fibers as minimum shear reinforcement in concrete beams. *ACI Struct J.*;111(5):1191–1202.
18. Amin A, Foster SJ., 2016, Shear strength of steel fibre reinforced concrete beams with stirrups. *Eng Struct.*;111:323–332.
19. Frazão, C.M.V.; Barros, J.A.O.; Camões, A.F.L.L.; Alves, A.; Rocha, L., 2016, Corrosion effects on pullout behavior of hooked steel fibers in self-compacting concrete, *Cement and Concrete Research*, 79, 112-122, January 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.09.005>.
20. Frazão, C.M.V., 2019, *Recycled steel fiber reinforced concrete for Structural elements subjected to chloride attack: mechanical and durability performance*, PhD thesis, University of Minho.
21. Nobili, A.; Lanzoni, L.; Tarantino, A.M., 2013, Experimental investigation and monitoring of a polypropylene-based fiber reinforced concrete road pavement, *Construction and Building Materials*, 47, 888-895.
22. Chen Y.; Cen G.; Cui, Y., 2018, Comparative analysis on the anti-wheel impact performance of steel fiber and reticular polypropylene synthetic fiber reinforced airport pavement concrete under elevated temperature aging environment, *Construction and Building Materials* 192, 818–835, ISSN 09500618, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2018.10.175](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.175).
23. Yang, M.; Shin, H.-O.; Yoo, D.-Y., 2017, Benefits of using amorphous metallic fibers in concrete pavement for long-term performance, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 17 (4), 750–760, ISSN 16449665, doi: [10.1016/j.acme.2017.02.010](https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.010).
24. Conforti, A.; Tiberti, G.; Plizzari, G.A.; Caratelli, A.; Meda, A., 2017, Pre-cast tunnel segments reinforced by macro-synthetic fibers, *Tunnelling and Underground Space Technology* 63, 1–11, ISSN 08867798, doi: [10.1016/j.tust.2016.12.005](https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.12.005).
25. Soetens, T., 2015, *Design models for the shear strength of prestressed precast steel fibre reinforced concrete girders*, PhD thesis, Gent University.
26. Gonilha, J.A.; Barros, J.A.O.; Correia, J.R.; Sena-Cruz, J.M.; Branco, F.A.; Ramos, L.F.; Gonçalves, D.F.; Alvim, M.R.; Santos, T., 2014, Static, dynamic and creep behaviour of a full-scale GFRP-SFRSCC hybrid footbridge, *Composite Structures* 118, 496–509, ISSN 02638223, 2014. doi:[10.1016/j.compstruct.2014.08.009](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.08.009).
27. Barros, J.A.O., 2016, Fiber reinforced concrete and glass fibre reinforced polymer systems for the development of more sustainable construction systems, in: *9th RILEM International Symposium on Fiber Reinforced Concrete, BEFIB*, Vancouver, Canada,.
28. Abrishambaf, A.; Cunha, V.; Barros, J.A.O., 2016, The influence of fibre orientation on the post-cracking tensile behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete, *Fracture and Structural Integrity Journal*, Volume 31, 1, 38-53, January 2016.
29. Ferrara, L.; Meda, A., 2006, Relationship between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements, *Materials and Structures*, 39, 411-420.
30. Ozyurt, N.; Mason, T.O.; Shah, S.P., 2007, Correlation of Fibre Dispersion, Rheology and Mechanical Performance of FRCs, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 29, No.2, 70-79.
31. Ferrara, L.; Ozyurt, N.; di Prisco, M., 2011, High mechanical performance of fibre reinforced cementitious composites: the role of -casting-flow induced- fibre orientation, *Materials and Structures*, 44, 109 – 128.
32. Gudzulic, V.; Dang, T.; Meschke, G., 2018, Computational modeling of fiber flow during casting of fresh concrete, *Computational Mechanics*, 63(6), 1111-1129.
33. Carvalho, M.R.; Barros, J.A.O.; Zhang, Y.; Dias-da-Costa, D., 2020, A computational model for simulation of steel fibre reinforced concrete with explicit fibres and cracks, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Elsevier, 363: 112879, (doi: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.112879>).
34. Chi, Y.; Yu, M.; Huang, L.; Xu, L., 2017, Finite element modeling of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete using modified concrete damaged plasticity, *Engineering Structures*, 148, 23-35.
35. Zhan, Y.; Meschke, G., 2017, Adaptive Crack Modeling with Interface Solid Elements for Plain and Fiber Reinforced Concrete Structures. *Materials*, 10(7), 771.
36. Dancygier, A. N.; Berkover, E., 2016, Cracking localization and reduced ductility in fiber-reinforced concrete beams with low reinforcement ratios, *Engineering Structures*, 111, 411-424.
37. Teixeira, M.D.E.; Barros, J.A.O.; Cunha, V.M.C.F.; Moraes-Neto, B.N.; Ventura-Gouveia, A., 2015, Numerical simulation of the punching shear behaviour of self-compacting fibre reinforced flat slabs, *Construction and Building Materials journal*, 74, 25-36, January 2015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.003. <http://hdl.handle.net/1822/38262>
38. Deluce, J. R.; Lee, S. C.; Vecchio, F. J., 2014, Crack Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete Members Containing Conventional Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 111(1), 93–102. <https://doi.org/10.14359/51686433>
39. Cunha, V.M.C.F.; Barros, J.A.O.; Sena-Cruz, J.M., 2012, A finite element model with discrete embedded elements for fibre reinforced composites, *Computers and Structures Journal*, 94-95, 22-33.
40. Oliver, J.; Mora, D.F.; Huespe, A.E.; Weyler, R., 2012, A micromorphic model for steel fiber reinforced concrete, *International Journal of Solids and Structures*, 49(21): 2990-3007.
41. Lee, S.C.; Cho, J.Y.; Vecchio, F.J., 2011, Diverse Embedment Model for Steel Fiber-Reinforced Concrete in Tension: Model Verification, *ACI Materials Journal*, 108(5), 526–535. <https://doi.org/10.14359/51685787>.
42. Seow P.E.C.; Swaddiwudhipong, S., 2006, Modeling of steel fiber-reinforced concrete under multi-axial loads, *Cement and Concrete Research*, 36, 1354–1361.
43. Padmarajaiah, S.K.; Ramaswamy, A., 2002, A finite element assessment of flexural strength of prestressed concrete beams with fibre reinforcement, *Cement and Concrete Composites*, 24, 229-241.
44. Vorel J.; Kabele, P., 2019, Inverse analysis of traction-separation relationship based on sequentially linear approach, *Computers & Structures*, vol. 212, pp. 125–136, Feb. 2019.
45. Soltanzadeh, F.; Cunha, V.M.C.F.; Barros, J.A.O., 2019, Assessment of different methods for characterization and simulation of post-cracking behavior of self-compacting fiber reinforced concrete, *Construction and Building Materials Journal*, 227, 116704, December 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116704>
46. Salehian, H.; Barros, J.A.O., 2015, Assessment of the performance of steel fibre reinforced self-compacting concrete in elevated slabs, *Cement and Concrete Composites*, 55, 268-280, January 2015. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.016. <http://hdl.handle.net/1822/38275>

47. Rots J.G.; Nauta P.; Kusters G.M.A.; Blaauwendraad, J., 1985, Smearred crack approach and fracture localization in concrete, *HERON*, 30(1), 1-48.
48. Rots, J.G., 1988, *Computational modeling of concrete fracture*, PhD Thesis, Delft University of Technology.
49. Pruijssers A.F., 1985, Description of the stiffness relation or mixed-mode fracture problems in concrete using the rough-crack model of Walraven, *TU-Delft Report, Department of Civil Engineering*, No. 5-28-2.
50. Cervenka V.; Pukl H.; Eligehausen R., 1990, Computer simulation of anchoring technique and design of concrete structures, *Proc. Second Intern. Conf. on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures*, Zell am See, Austria, 1-19.
51. Rots J.G.; de Borst R., 1987, Analysis of mixed mode fracture in concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 113(11), 1739-1758.
52. Ventura Gouveia, A.; Barros, J.A.O.; Azevedo, A.F.M., 2011, Crack constitutive model for the prediction of punching failure modes of fiber reinforced concrete laminar structures, *Computers & Concrete*, 8(6), 735-755.
53. Vecchio FJ., 2001, Non-linear finite element analysis of reinforced concrete: At the crossroads? *Struct Concr.* 2001;2:201-212.
54. Collins MP, Vecchio FJ, Mehlhorn G., 1985, An international competition to predict the response of reinforced concrete panels. *Canadian J Civil Eng*;12:624-644.
55. Foster SJ, Agarwal A, Amin A., 2018, Design of SFRC beams for shear using inverse analysis for determination of residual tensile strength. *Struct Concr*;19:129-140.
56. Cuenca E, Conforti A, Minelli F, Plizzari GA, Gregori JN, Serna P., 2018, A material-performance-based database for FRC and RC elements under shear loading. *Mater Struct*.;51(11):1130-1137.
57. Barros JAO, Foster S., 2018, An integrated approach for predicting the shear capacity of fibre reinforced concrete beams. *Eng Struct J*.;174:346-357. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.07.071>.
58. *fib Model Code 2010: fib Model Code for Concrete Structures*, 2010.
59. NP EN 12390-3:2011. Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens.
60. NP EN 12390-13:2014. Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression.
61. NP EN ISO 6892-1:2016. Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature.

ANEXO A RESULTADOS DE LOS PARTICIPANTES

Las figuras A1 a A10 muestran los resultados de cada participante. Las curvas promedio experimental y numérica de carga-deflexión y deformación-deflexión se muestran en la parte izquierda de cada figura. Nótese que para una mejor comparación de resultados, las escalas de carga y deflexión se han mantenido iguales en todas las figuras. El patrón de fisuras obtenido en carga máxima se muestra en la parte derecha de las figuras.

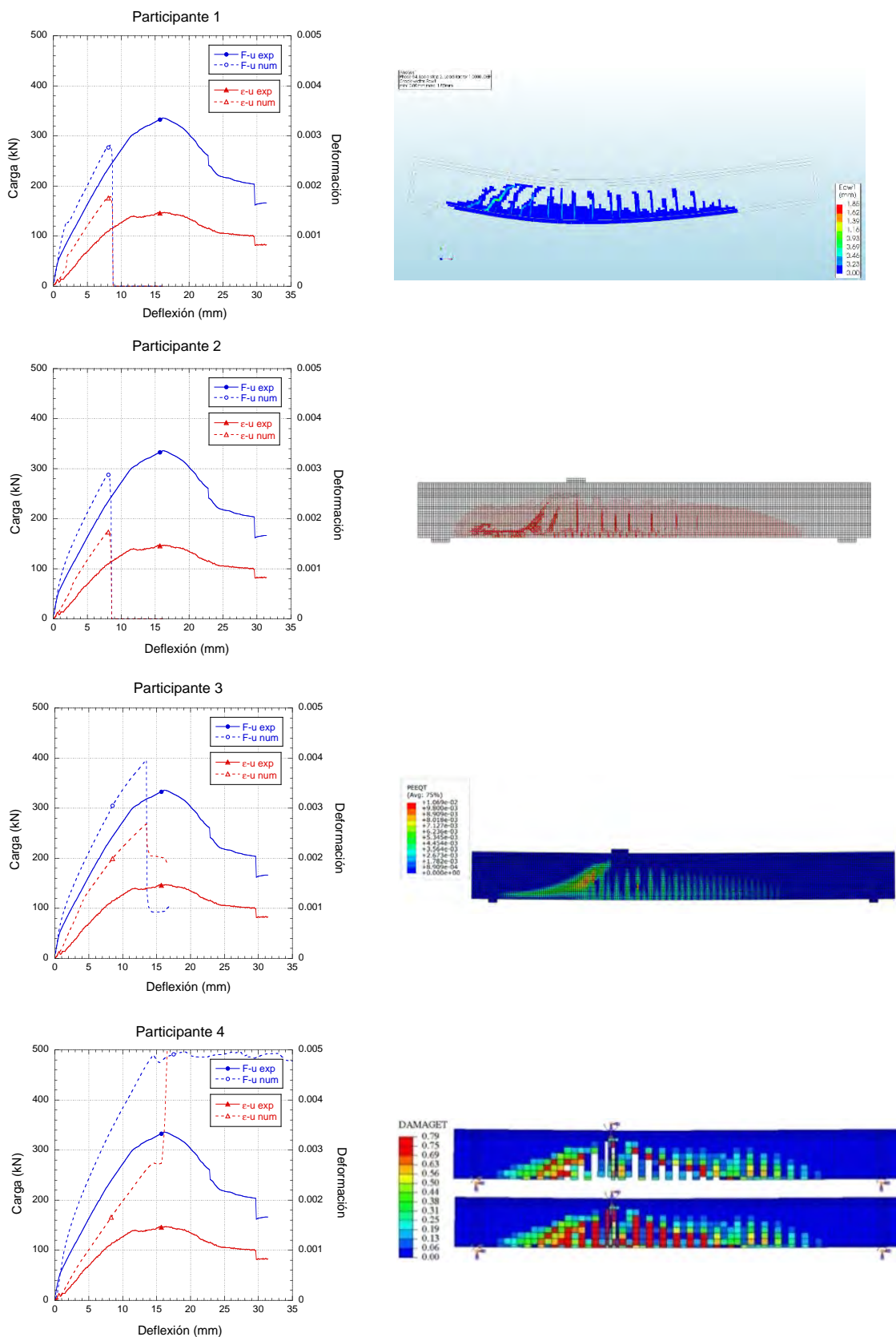


Figura A1 - Resultados de los participantes 1 a 4.

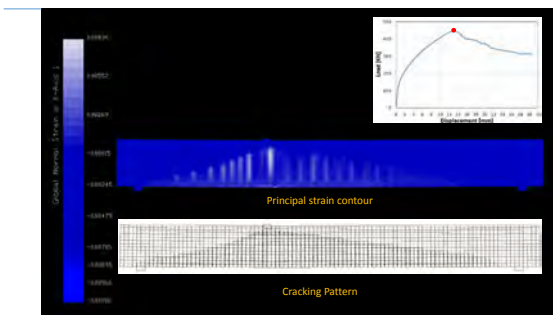
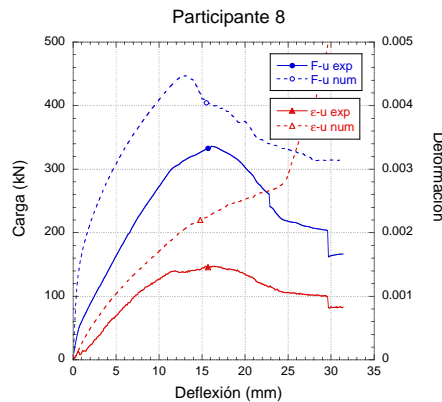
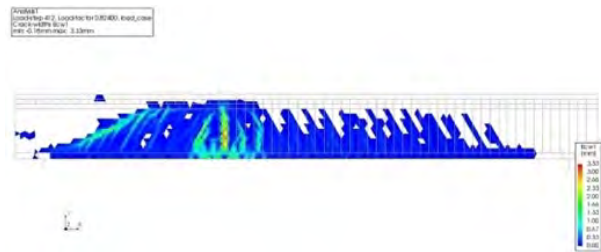
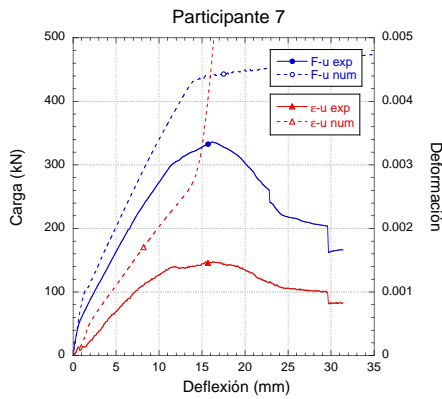
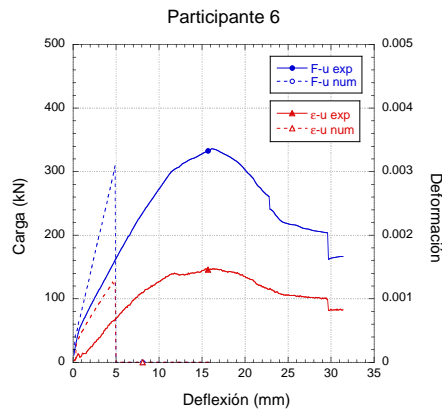
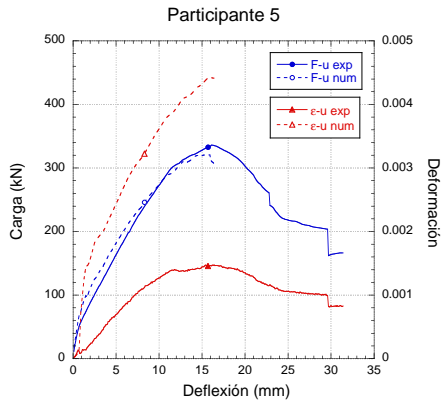


Figura A2 – Resultados de los participantes 5 a 8.

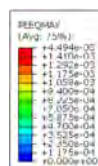
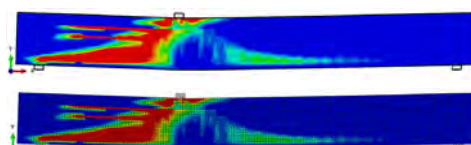
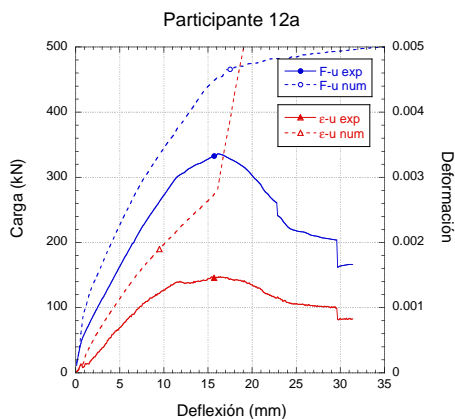
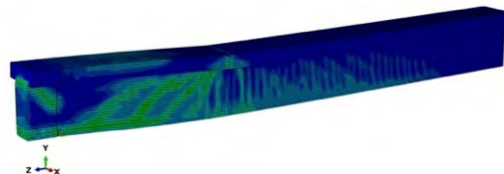
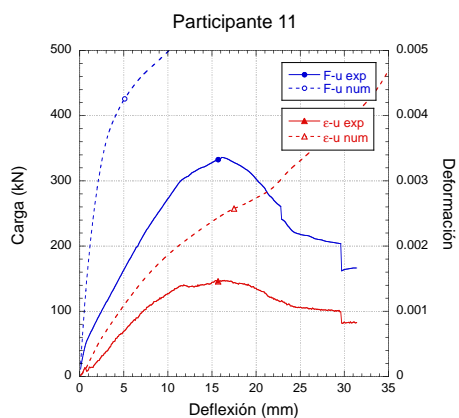
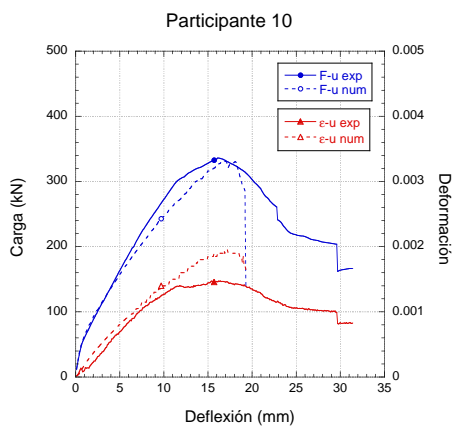
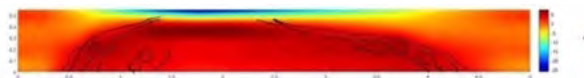
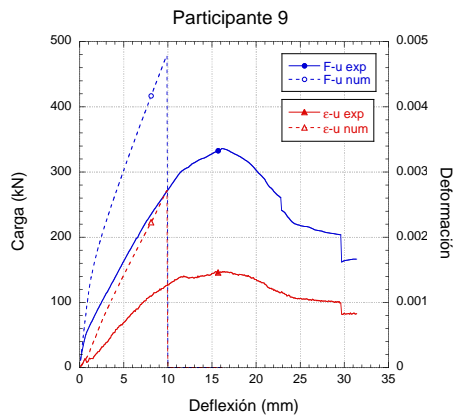


Figura A3 – Resultados de los participantes 9 a 12a.

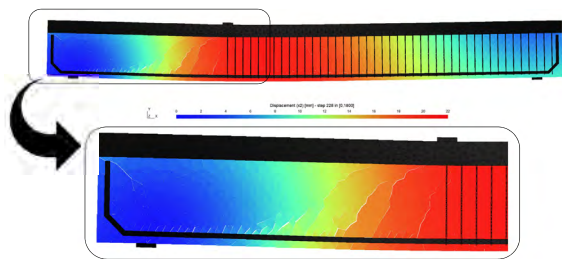
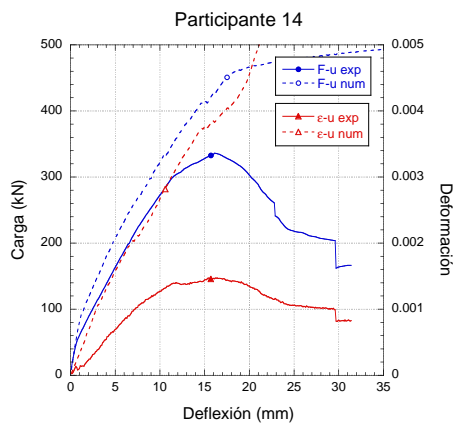
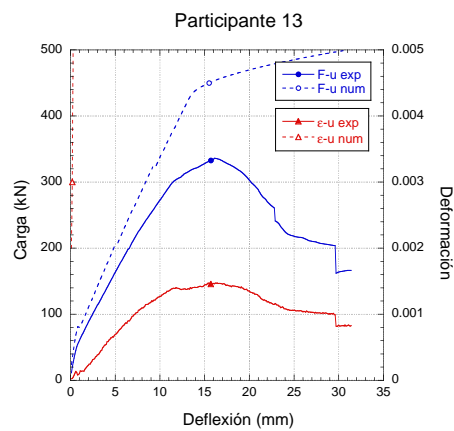
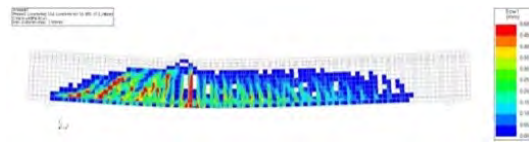
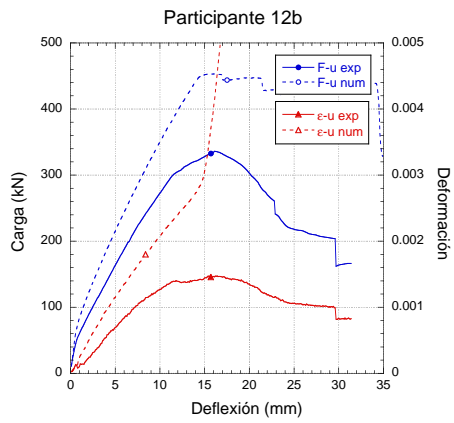


Figure 6. Deformation of the beam ($\times 2$) and cracking patterns at Peak (step 228) – flange material cannot crack

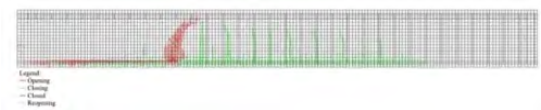
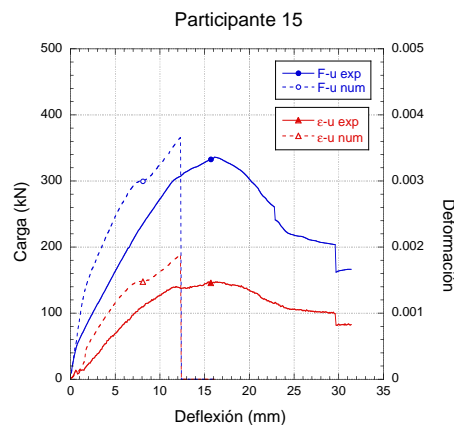


Figura A4 - Resultados de los participantes 12b a 15.

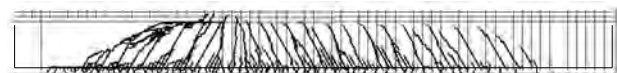
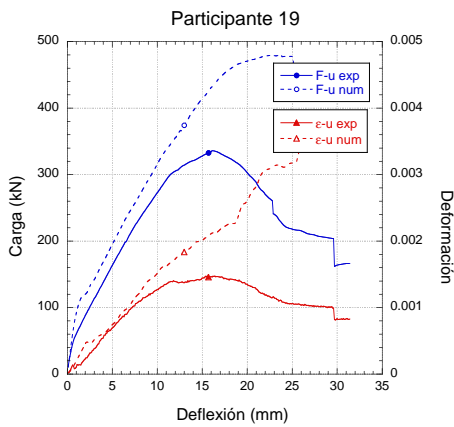
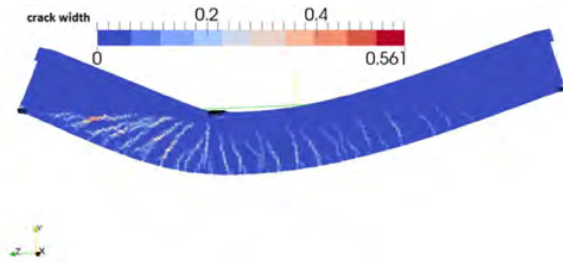
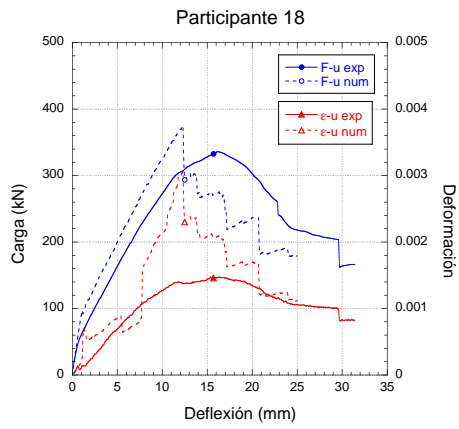
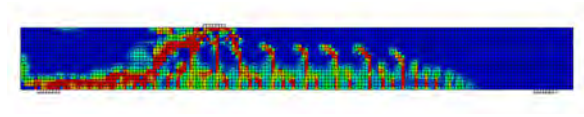
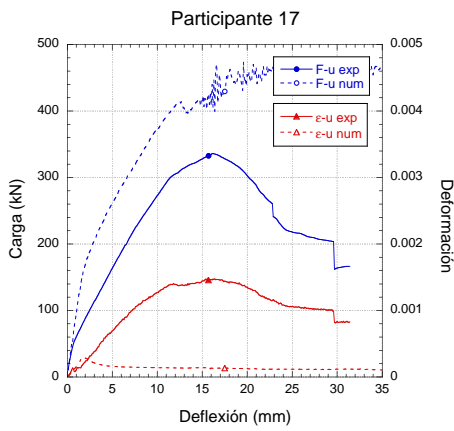
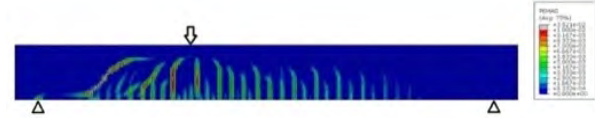
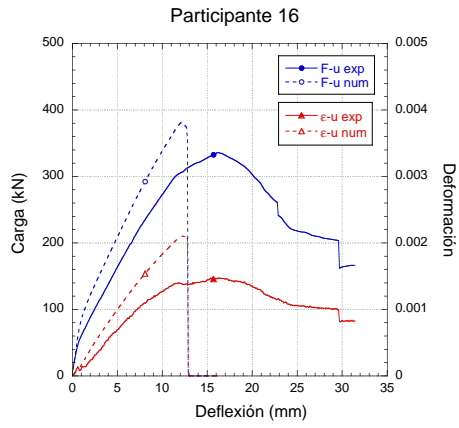


Figura A5 - Resultados de los participantes 16 a 19.

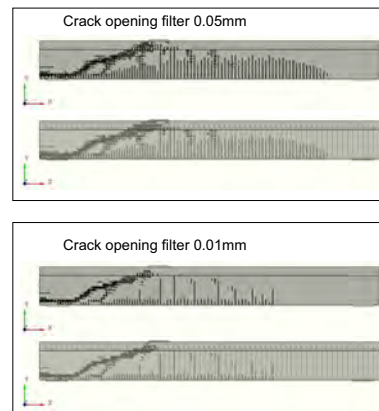
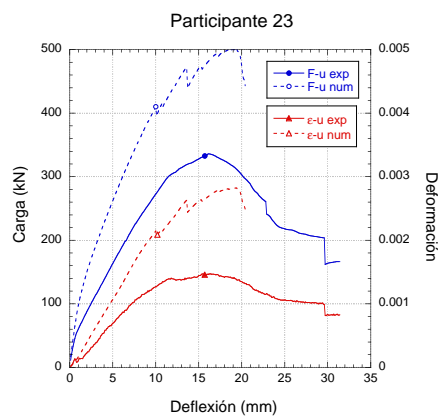
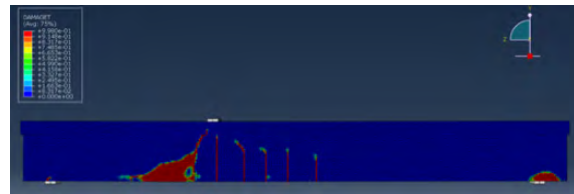
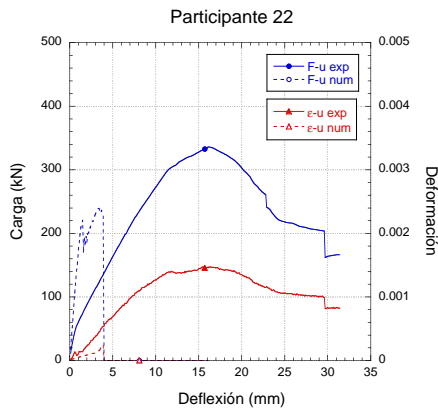
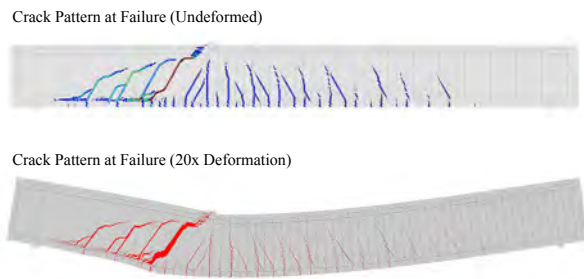
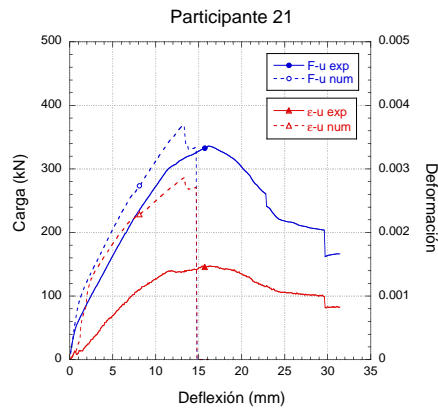
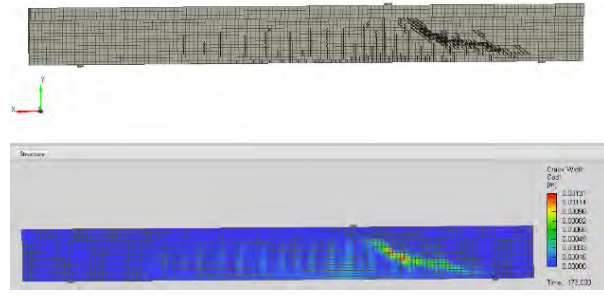
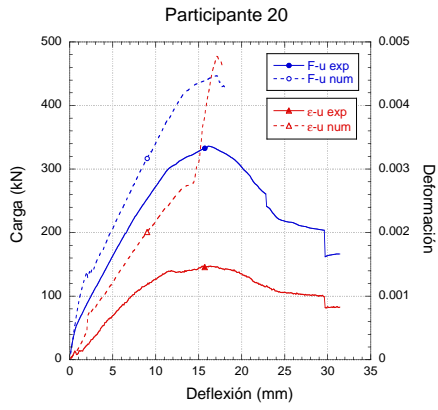


Figura A6 - Resultados de los participantes 20 a 23.

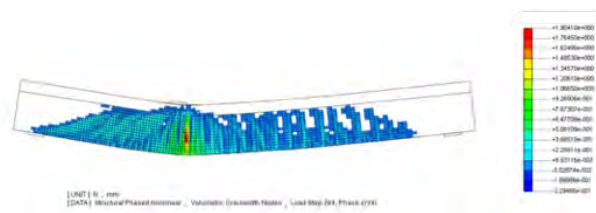
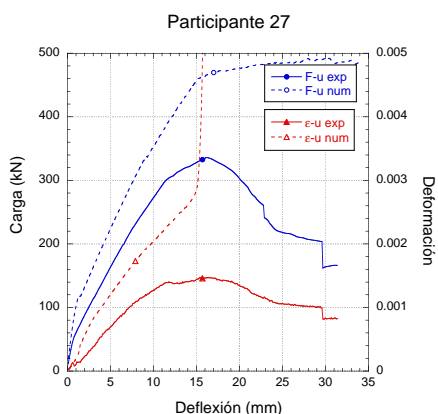
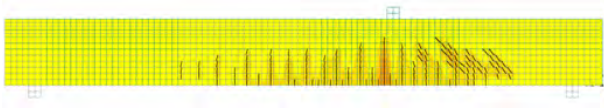
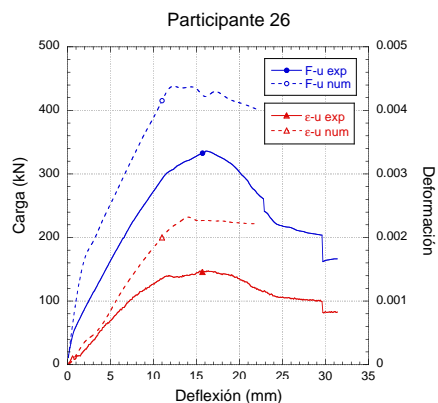
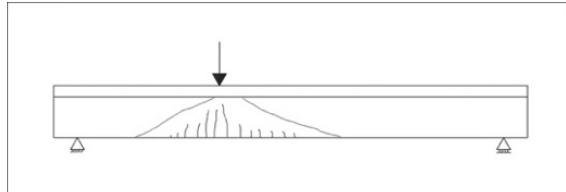
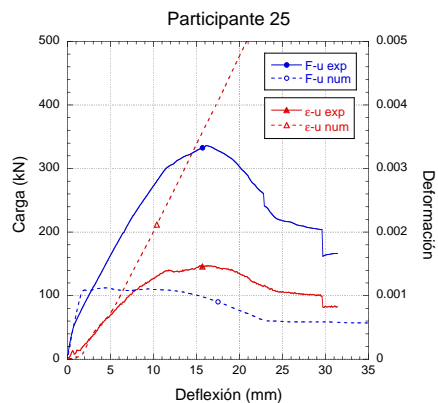
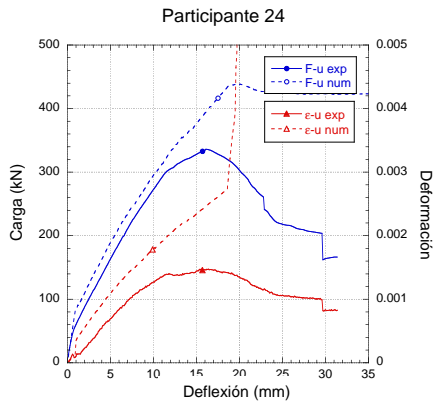


Figura A7 - Resultados de los participantes 24 a 27.

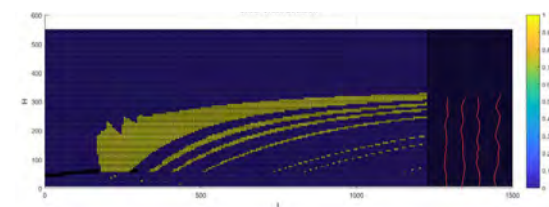
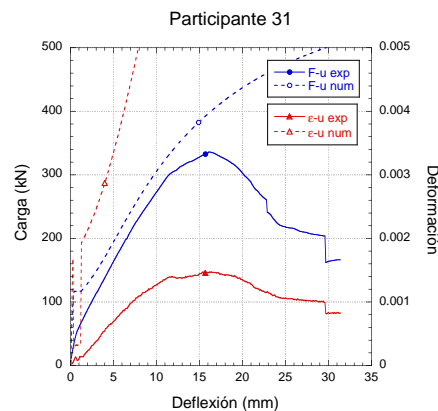
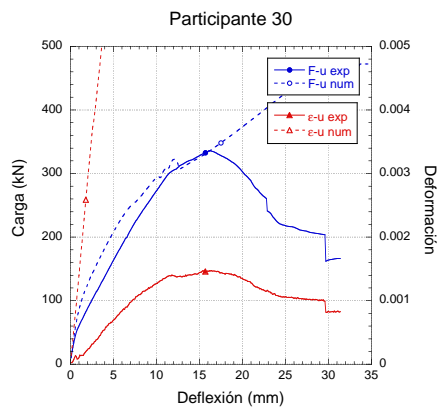
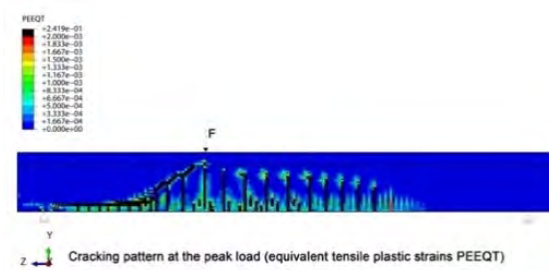
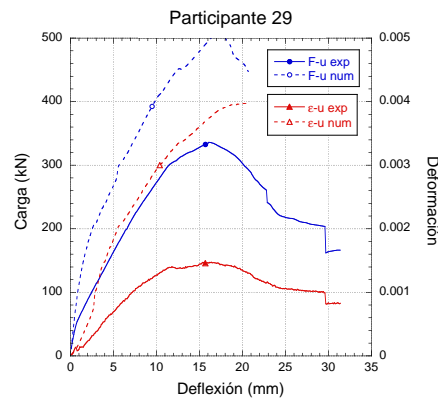
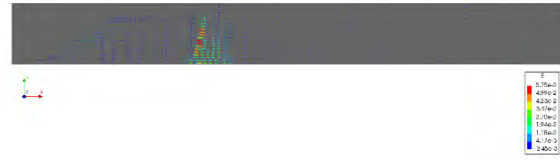
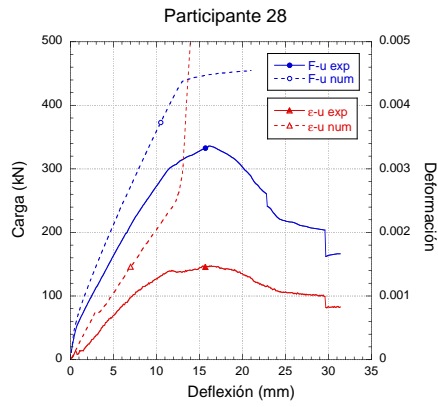


Figure a. collective crack pattern of flexural and shear at the ultimate load (467.29kN) Red lines represent flexural cracks due to normal stress larger than 3.5 MPa in localized zone. Yellow lines diagonal tension cracks outside Lp zone larger than 3.5 MPa.

Figura A8 - Resultados de los participantes 28 a 31.

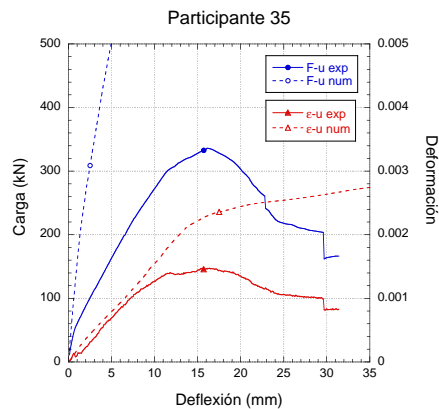
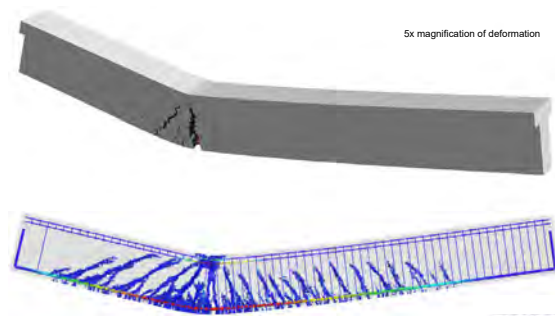
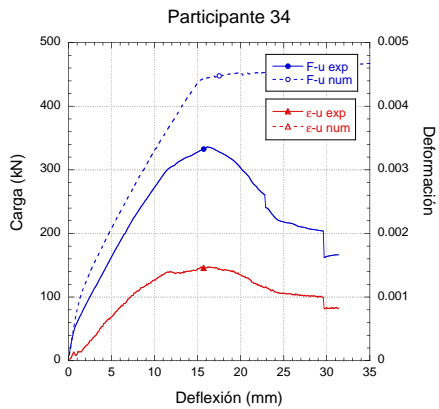
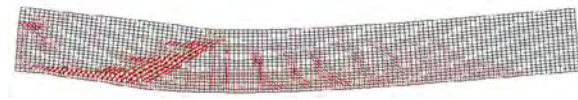
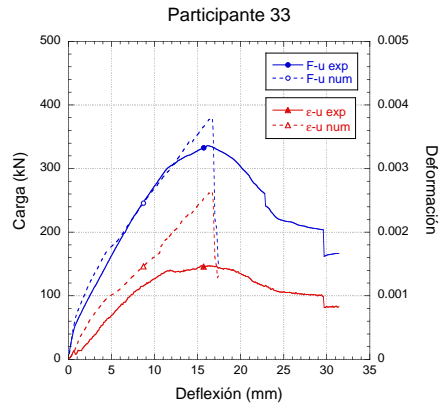
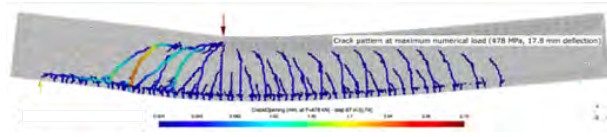
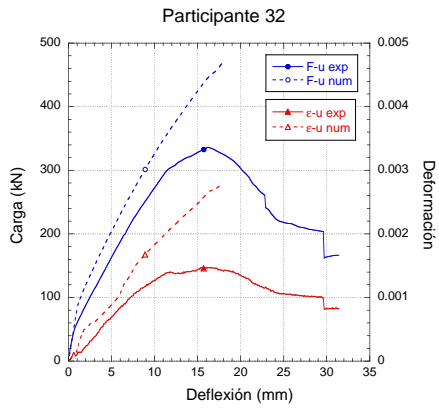


Figura A9 - Resultados de los participantes 32 a 35.

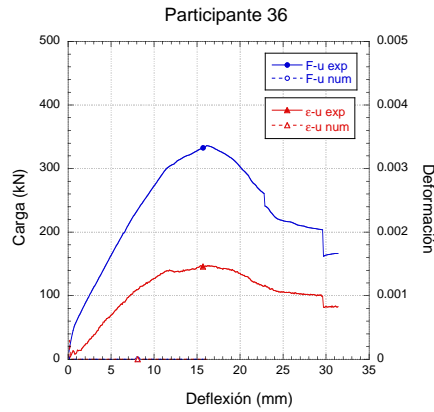


Figura A10 - Resultados del participante 36.

ANEXO B PARTICIPANTES

A continuación, se incluye la lista de participantes y su afiliación. Los autores les agradecen su participación en el concurso.

- Alejandro Nogales¹, Nikola Tošić², Albert de la Fuente²: ¹Smart Engineering Ltd, UPC Spin-Off, Barcelona, España; ²Civil and Environmental Engineering Department, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, España
- Alexander Kagermanov: University of Applied Science Rapperswil, Suiza
- Antonio A. Cristian: Technical University of Civil Engineering of Bucharest
- Barzin Mobasher, Devansh Deepak Patel, Chidchanok Plesudjai: Material Model ASU Team
- Camille A. Issa, Najwa Hani: Lebanese American University
- Christoph Betschoga, Michael Huß, Yolcu Sever, Nguyen Duc Tung: Institute of Structural Concrete, Graz University of Technology, Graz, Austria
- Dong Xiang: Tongji University, China
- George Markou: Faculty of Engineering, University of Pretoria, Hatfield, Suráfrica
- Gerrit E. Neu, Michael Hofmann, Günther Meschke: Institute for Structural Mechanics, Ruhr University of Bochum, Alemania
- Gili L. Sherzer, Younes F. Alghalandis, Karl Peterson, Giovanni Grasselli: University of Toronto, Canada
- Giulio Zani, Matteo Colombo, Marco di Prisco: Politecnico di Milano, Department of Civil and Environmental Engineering, Italia
- Hiroki Ogura¹, Minour Kunieda²: ¹Shimizu Corporation, Japan, ²Gifu University, Japón
- Inkyu Rhee, Jae-Min Kim: Department of Civil Engineering, Chonnam National University, Gwangju, Corea del Sur
- Jaime Planas¹, Beatriz Sanz¹, José M. Sancho²: ¹Dep. Ciencia de Materiales, ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, ²Dep. Estructuras de Edificación, ETS Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España
- Jan Červenka: Červenka Consulting
- Jia-Qi Yang, Zhiyuan Li, Peizhao Zhou, Chongfeng Xie: Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing, China
- José Joaquín Ortega: Universidad de Castilla-La Mancha, España
- Josef Landler, Sören Faustmann, Oliver Fischer: Technical University of Munich, Department of Civil, Geo and Environmental Engineering, Munich, Alemania
- Lex van der Meer, Kris Riemens, Srinidhi Ramadas, Yue Dai: ABT, Países Bajos
- Luís M.P. Matos¹, António V. Gouveia²: ¹Department of Civil Engineering, University of Minho, ²Department of Civil Engineering, Polytechnic Institute of Viseu, Portugal
- Marcos A. da Silva, Luiz C. de Almeida, Leandro Mouta Trautwein: Universidade Estadual de Campinas, School of Civil Engineering, Architecture and Urbanism, Laboratório de Modelagem Estrutural e Monitoração, Campinas-SP, Brasil
- Mário Pimentel, Rui Valente: University of Porto, Faculty of Engineering, Porto, Portugal
- Mladena Lukovic, Dawei Gu, Erik Schlangen: TU Delft, Países Bajos
- Mohmaed Hamza¹, Hamed Salem²: ¹Applied Science International, Cairo, Egypt, ²Structural Engineering Department, Cairo University, Egipto
- Monday Isojeh: Hatch Limited
- Osvaldo L. Manzoli¹, Luís A.G. Bitencourt Jr.², Yasmin T. Trindade²: ¹São Paulo State University, Department of Civil Engineering, Bauru-SP, Brazil, ²University of São Paulo, Department of Structural and Geotechnical Engineering, São Paulo-SP, Brasil
- Peter K. Juhasz, Peter Schaul: JPK Static Ltd, Department of Construction Materials and Technologies, Budapest University of Technology and Economics
- Pim van der Aa, Ab van den Bos: Diana FEA BV
- Rafael A. Sanabria: Universidade Estadual de Campinas, Laboratório de Modelagem Estrutural e Monitoração, Brasil
- Rutger Vrijdaghs: Department of Civil Engineering, KU Leuven, Bélgica
- Saeid Mehrpay¹, Tamon Ueda²: ¹Hokkaido University, Japan, ²Shenzhen University, RP China
- Shen Le^{1,2}, Ding Miao^{1,2}, Yang Bo^{1,2}: ¹School of Civil Engineering, Chongqing, China, ²Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area, Chongqing University, China
- Song Jin, Yating Tai, Yun Tian, Chenghuan Lin, Xiyao Zhao, Meng Zhang, Qingqing Wu, Jikai Zhou: College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, China
- Tiago Valente, Inês Costa, Lúcio Lourenço, Christoph de Sousa, Felipe Melo, Cristina Frazão: CiviTest-Pesquisa de Novos Materiais para a Engenharia Civil, Lda., Vila Nova de Famalicão, Portugal
- Zhongyue Tracy Zhang, Frank J. Vecchio: University of Toronto, Canada
- Ziyang Zhang, Linyou Zhang, Weiting Chen, Yong Li: Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, China