

COMPORTAMIENTO CICLICO DE VIGAS DE HORMIGON REFORZADO CON FIBRAS

CYCLIC BEHAVIOUR OF FIBER REINFORCED CONCRETE BEAMS

Gustavo Augusto Benito^a, Paula Luciana Argañaraz^a, Facundo Isla^{a,b,c}, Bibiana Luccioni^{a,b,c}

^aInstituto de Estructuras "Arturo M. Guzmán", FACET, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina, plarganarazsaenz@herrera.unt.edu.ar, fisla@herrera.unt.edu.ar, bluccioni@herrera.unt.edu.ar, gustavoaugustobenito@gmail.com, <http://www.facet.unt.edu.ar/iest/>

^bCONICET, Godoy Cruz 2290, C1425FQB CABA, Argentina, <http://www.conicet.gov.ar/>

^cFundación CIMNE - IBER

Palabras clave: comportamiento cíclico, hormigón reforzado con fibras, plasticidad acoplada con daño, compuesto.

Resumen: Muchas de las estructuras en las que se está utilizando hormigón reforzado con fibras (HRF), ya sea como único material o como refuerzo, resultan sometidas a cargas cíclicas. Para poder evaluar el comportamiento de estas estructuras es importante contar con modelos numéricos que permitan predecir el comportamiento del HRF bajo cargas cíclicas. En este trabajo se presenta la calibración de un modelo elasto-plástico acoplado con daño desarrollado para HRF. El modelo logra simular adecuadamente ensayos experimentales de vigas con entalla de hormigón simple y de hormigón reforzado con fibras de acero con ganchos con distintos contenidos de fibras bajo flexión con carga monótona creciente y bajo ensayos flexión con carga/descarga cíclica. Permite reproducir aproximadamente la rigidez de la descarga en los ensayos cíclicos. Al igual que en los ensayos, el modelo muestra que la degradación de rigidez y, por tanto, la disipación de energía bajo cargas cíclicas depende del contenido de fibras.

Keywords: Cyclic behaviour, fiber reinforced concrete, coupled plasticity and damage, composite.

Abstract: Many of the structures in which fiber reinforced concrete (FRC) is being used, either as the sole material or as reinforcement, are subjected to cyclic loading. In order to evaluate the behavior of these structures, it is important to have numerical models that allow predicting the behavior of the HRF under cyclic loads. This work presents the calibration of an elasto-plastic model coupled with damage developed for FRC. The model is able to simulate experimental tests of notched beams made of concrete and concrete reinforced with (SFRC) with hooks with different fiber contents under bending with monotonic increasing load and under bending tests with cyclic loading/unloading. It approximately reproduces unloading stiffness observed in cyclic tests. As in the tests, the model shows that stiffness degradation and energy dissipation under cyclic loading depends on the fiber content.

1 INTRODUCCION

Muchas estructuras fueron construidas y diseñadas bajo los lineamientos de viejas reglamentaciones y no presentan la suficiente resistencia lateral y ductilidad para disipar la energía transmitidas para solicitaciones sísmicas severas. Por otro lado, muchas de estas estructuras fueron severamente dañadas por sismos de gran magnitud y necesitan ser intervenidas para su recuperación con nuevos materiales y técnicas constructivas, de tal forma de poder cumplir con los requerimientos técnicos de la actualidad y garantizar la seguridad estructural.

El uso del hormigón reforzado con fibras para el refuerzo de estructuras fue estudiado en las últimas décadas (Shannag et al., 2005; Wang y Lee, 2007; Khan et al., 2018; Tong et al., 2019). Estos materiales son adecuados para las intervenciones de estructuras dañadas debido a sus propiedades mecánicas, físicas y su compatibilidad con el hormigón armado (Wang y Lee, 2007). Con una dosificación adecuada y el agregado de fibras, se puede mejorar el comportamiento mecánico, aumentando la ductilidad global de la estructura y la capacidad de disipación de energía.

Los resultados disponibles son alentadores, pero aún se requiere más información para poder desarrollar modelos números. Se deben desarrollar modelos constitutivos capaces de reproducir el comportamiento bajo cargas cíclicas (Han et al., 2003; Kesner et al., 2003).

La carga cíclica afecta el comportamiento mecánico de los compuestos de cemento reforzado con fibras y puede producir fallos por fatiga bajo cargas inferiores a la capacidad de carga monótona del material (Zhang et al., 1999). La mayoría de las investigaciones realizadas sobre el comportamiento cíclico de los compuestos de cemento reforzado con fibras se han centrado en el estudio de la fatiga cíclica de alta intensidad. El objetivo principal de esos estudios fue determinar el número de ciclos que las probetas pueden soportar bajo carga cíclica entre un nivel mínimo y un nivel máximo de carga (González et al., 2015; González et al., 2018).

El presente trabajo se centra en el análisis de la respuesta histerética del HRF bajo carga cíclica cuasiestática, con el propósito de proporcionar información experimental para la modelización del comportamiento cíclico y calibrar el modelo elasto-plástico acoplado con daño desarrollado para HRF.

2 ENSAYOS

Se estudiaron tres tipos de hormigón: un hormigón simple (HS) y dos HRF, variando los contenidos de fibra. Todo el hormigón se preparó utilizando la misma matriz autocompactante. Para los HRF, se utilizaron fibras de acero con ganchos en los extremos de 50 mm de longitud y 0.75 mm de diámetro, con una resistencia nominal a la tracción de 1100 MPa. Se elaboraron dos HRF con contenidos nominales de fibras de 40 kg/m³ (0.5% en volumen) y 60 kg/m³ de fibras (0.75% en volumen), que se denominaron HRF40 y HRF60 respectivamente.

Para evaluar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, se utilizaron probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro x 200 mm de alto. Los resultados se presentan en la [Tabla 1](#).

Hormigón	HS	HRF40	HRF60
Resistencia a compresión [MPa]	49.7 (1.8)	58.2 (4.8)	57.2 (6.5)
Módulo de elasticidad [GPa]	42.1	41.8	42.1

Tabla 1. Resistencia a compresión y módulo de elasticidad del hormigón

Se realizaron ensayos a flexión bajo carga monótona creciente, y carga cíclica, carga/descarga en especímenes prefisurados. En ambos casos, se trata de cargas cuasi estáticas sobre vigas prismáticas de 100 mm x 100 mm x 400 mm con una entalla de 16.6 mm de altura

en la parte inferior de la viga como se muestra en la [Figura 1](#), donde también se esquematizan las cargas y los apoyos. El dispositivo de carga permite aplicar tanto carga hacia abajo como carga hacia arriba en el caso de ensayos de carga cíclica con reversión de carga que no se incluye en este trabajo.

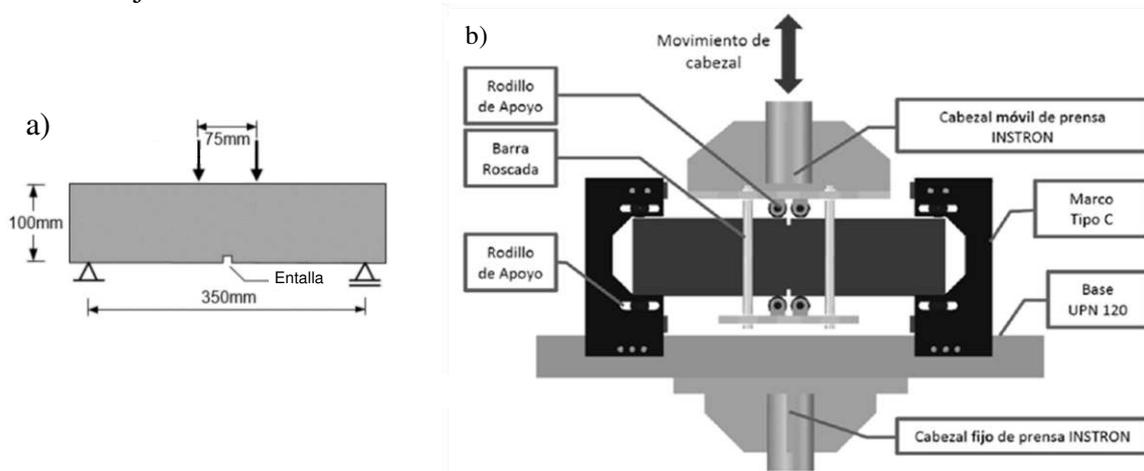


Figura 1. Especímenes ensayados a flexión. a) Esquema de carga; b) Dispositivo de carga

Los ensayos con carga monótona consistieron en aplicar desplazamientos crecientes hacia abajo en las vigas. Después de los ensayos, los especímenes se separaron en dos partes y se contaron las fibras que cruzaban la sección central. El contenido resultante de fibras en la sección central se presenta en la [Tabla 2](#). El contenido promedio de fibras se acerca al nominal, pero hay variaciones entre los especímenes de la misma mezcla. A pesar de que las vigas tenían la misma altura nominal neta, en realidad no eran idénticas, por lo que la altura real también se incluye en la [Tabla 2](#).

La tensión máxima promedio (f_{max}) para el hormigón simple fue de 82.3 MPa. Se calcularon el primer pico (tensión máxima hasta apertura de fisura ($CMOD$) = 0.05 mm) (f_L), la tensión máxima (f_{max}) y dos tensiones residuales (f_{R1} , f_{R3}) correspondientes a $CMOD1 = 0.5$ mm y $CMOD3 = 2.5$ mm ([CEN-European Committee for Standardization, 2005](#)), como se indica en [Giaccio et al. \(2010\)](#), y se presentan en la [Tabla 2](#).

Se puede observar una alta dispersión de resultados obtenidos para las vigas de HRF bajo flexión estática. Esta dispersión también ha sido reportada por otros autores ([Buratti et al., 2011](#); [Caggiano et al., 2012](#)) en el caso de hormigón normal que incluye fibras de acero con ganchos en los extremos, y se debe a la variación en el contenido de fibras en la superficie de la fisura de la zona media de vigas hechas con la misma mezcla de hormigón (ver [Tabla 2](#)).

Ocho vigas HFR40 y ocho vigas HFR60 fueron sometidas a pruebas cíclicas de carga y descarga. Se tomó una carga de 0.5 kN como referencia para estas pruebas. La carga se incrementó con control de desplazamiento para fisurar las vigas. Esta primera parte de las pruebas se realizó con control de desplazamiento a una velocidad de 2 mm/min hasta que se alcanzaron 0.25 mm de desplazamiento vertical. Este desplazamiento corresponde aproximadamente a $CMOD = 0.25$ mm. Luego, la carga se redujo a la carga de referencia (0.5 kN). A continuación, se realizaron 40 ciclos de carga/descarga entre la carga de referencia (0.5 kN) y la carga alcanzada en la etapa de fisuración previa correspondiente a una deflexión de 0.25 mm utilizando control de carga. Finalmente, las vigas se cargaron con control de desplazamiento para evaluar su capacidad residual después de la carga cíclica. En algunos casos que mostraron endurecimiento por deformación, los 40 ciclos de carga/descarga no se pudieron completar debido a que, después de cierto número de ciclos, ya no se pudo alcanzar la carga máxima y las pruebas continuaron con un aumento de desplazamiento hasta la falla.

Después de las pruebas, las muestras se dividieron en dos partes y se contaron las fibras que cruzaban la sección central. Los contenidos resultantes de fibras en la sección de la fisura se presentan en la [Tabla 3](#) junto con las alturas netas reales de las vigas.

Vigas	Altura [mm]	fL [MPa]	$Fmax$ [MPa]	$fR1$ [MPa]	$fR3$ [MPa]	Vf [%]		
						Total	Abajo	Arriba
40-1 M	84	9.66	10.64	9.11	9.65	0.63	0.89	0.45
40-2 M	83	8.85	8.85	7.85	7.38	0.51	0.73	0.36
40-3 M	82.5	8.78	8.78	3.92	3.16	0.29	0.29	0.28
40-4 M	82	9.41	10.43	9.74	9.88	0.57	0.83	0.4
40-5 M	82.5	9.39	10.15	10.1	6.51	0.87	1.08	0.73
40-6 M	83.5	9.79	9.79	7.94	6.13	0.52	0.39	0.61
40-7 M	78	8.81	8.88	5.6	4.16	0.43	0.4	0.47
40-8 M	81.5	10.1	10.1	7.29	6.59	0.44	0.49	0.41
Promedio	82.1	9.35	9.7	7.69	6.68	0.53	0.64	0.46
St. dev.	1.7	0.46	0.71	1.96	2.2	0.16	0.27	0.13
60-1 M	80	10.42	12.63	12.4	NA	0.87	1.03	0.78
60-2 M	86	12.46	12.48	10.1	7.77	0.73	0.59	0.83
60-3 M	82.5	9.38	12.57	11.43	10.79	0.8	1.11	0.6
60-4 M	82.5	10.9	12.61	10.9	9.19	0.57	0.92	0.34
60-5 M	82.3	12.24	13.04	12.24	10.61	1.04	1.25	0.9
60-6 M	82.5	12.28	12.53	12.28	10.05	0.84	0.88	0.82
60-7 M	80.5	11.92	12.06	11.92	9.16	0.69	0.67	0.71
60-8 M	79	9.87	11.33	9.87	7.71	0.5	0.43	0.56
Promedio	81.3	11.18	12.41	11.39	9.33	0.75	0.86	0.69
St. dev.	2	1.13	0.48	0.94	1.16	0.16	0.26	0.17

Tabla 2. Resultados de ensayos a flexión carga monótona

Vigas	Altura [mm]	VF [%]			Vigas	Altura [mm]	VF [%]		
		Total	Abajo	Arriba			Total	Abajo	Arriba
40-1	82.50	0.60	0.70	0.55	60-1	86.00	0.63	0.45	0.77
40-2	81.50	0.67	0.72	0.64	60-2	85.50	0.47	0.70	0.31
40-3	83.50	0.50	0.60	0.44	60-3	86.00	0.62	0.39	0.79
40-4	82.00	0.48	0.49	0.48	60-4	81.50	0.89	0.88	0.89
40-5	84.50	0.50	0.64	0.41	60-5	87.50	1.18	1.43	1.00
40-6	80.50	0.46	0.55	0.40	60-6	84.50	1.08	1.19	1.00
40-7	79.00	0.41	0.62	0.21	60-7	78.50	0.51	0.52	0.50
40-8	79.00	0.58	0.93	0.22	60-8	68.20	5 1.0	0 0.7	3 1.29
Promedio	81.60	0.53	0.66	0.42	Promedio	82.20	0.80	0.79	0.82
St. Dev.	1.90	0.08	0.13	0.14	St. Dev.	5.90	0.26	0.30	0.29

Tabla 3. Resultados de ensayos a flexión cargas cíclicas de carga y descarga

3 MODELO NUMÉRICO

El modelo utilizado para el HRF supone al mismo como un compuesto consistente en una matriz de hormigón con fibras dispersas en la misma en un número discreto de direcciones respecto a los ejes de referencia. Para modelar este compuesto se utiliza una modificación de la teoría de mezclas que parte de la hipótesis de compatibilidad de deformaciones:

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{ij})_h = (\varepsilon_{ij})_{F_k} \quad (1)$$

donde ε_{ij} y $(\varepsilon_{ij})_m$ son las deformaciones en el compuesto y cada una de las componentes; el subíndice h identifica al hormigón mientras que F_k identifica a las fibras en la dirección k con $k = 1, \dots, n$ direcciones.

Se supone que la deformación total de las fibras está compuesta por una deformación elástica ε_{ij}^e , una deformación inelástica ε_{ij}^i , y una deformación debida al deslizamiento ε_{ij}^s

$$(\varepsilon_{ij})_{F_k} = (\varepsilon_{ij}^e)_{F_k} + \underbrace{(\varepsilon_{ij}^i)_{F_k} + (\varepsilon_{ij}^s)_{F_k}}_{(\varepsilon_{ij}^{is})_{F_k}} \quad k = 1, \dots, n \quad (2)$$

La tensión se obtiene como suma de la de las componentes:

$$\sigma_{ij} = \sum_{m=1}^{n+1} k_m (\sigma_{ij})_m \quad (3)$$

donde $k_m = dV_m/dV$ es la correspondiente proporción volumétrica y $(\sigma_{ij})_m$ es la tensión en la componente m que se obtiene a partir de la ecuación constitutiva correspondiente.

Para el hormigón se utiliza se utiliza un modelo de daño escalar acoplado con plasticidad (Luccioni et al., 1996; Argañaraz et al., 2017). Este modelo resuelve simultáneamente el problema plástico con el de degradación de rigidez. Las condiciones de consistencia plástica y de daño se satisfacen simultáneamente en cada etapa de carga y conducen a dos ecuaciones lineales en λ y d , parámetro de consistencia plástica e incremento de la variable de daño escalar d , respectivamente.

La ley constitutiva secante se puede escribir como sigue:

$$\sigma_{ij} = (1 - d) C_{ijkl}^0 (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^p) \quad (4)$$

donde C_{ijkl}^0 es el tensor elástico inicial del material (sin daño).

Tanto para la función de fluencia como para la función de daño, se utiliza la función de Lubliner Oller (Lubliner et al., 1999). Para la evolución de las deformaciones plásticas se utiliza la regla de flujo de la plasticidad. Las variables de endurecimiento plástico y de daño se calculan normalizando las energías disipadas por plasticidad y daño respectivamente a la unidad.

En el caso de las fibras, se considera que el fenómeno inelástico de deslizamiento puede incluir deformaciones irreversibles y degradación de rigidez. La deformación plástica de las fibras mismas, en conjunto con el deslizamiento fibra-matriz, se modelan a través del mismo modelo elastoplástico acoplado con daño utilizado para la matriz, pero incluyendo en este caso la ortotropía de las fibras. Las fibras resisten en la dirección axial y, tanto la deformación elástica de las mismas como su deslizamiento respecto de la matriz, están orientados en la dirección axial de las mismas. Para tener en cuenta esta ortotropía, se usa el concepto de mapeo de espacios (Ruano et al., 2015). Se supone que existen dos espacios, el espacio ortótropo real y un espacio isótropo ficticio. Los tensores de tensión en ambos espacios están relacionados a través de un tensor de transformación que contiene la información sobre la ortotropía del material. El problema se resuelve en el espacio isótropo ficticio, utilizando para la función de fluencia y la función de daño la función de Von Mises y luego se mapean los resultados al espacio ortótropo real.

La función de endurecimiento de las fibras se define a través de curvas de pull-out obtenidas con un modelo de arrancamiento previamente desarrollado (Isla et al., 2022) o ensayos de arrancamiento de fibras.

4 SIMULACIONES NUMÉRICAS

El modelo numérico descrito se implementó en un programa de elementos finitos explícito que permite resolver problemas estáticos y dinámicos con no linealidad física y geométrica. La integración de la ecuación constitutiva del compuesto resulta simple ya que se suman los aportes de todas las componentes de acuerdo a la Ec.(3).

Con este programa se simuló los ensayos de la campaña experimental a los efectos de evaluar la capacidad de los modelos para reproducir el comportamiento del HRF frente a la carga cíclica.

En la Tabla 4 se presentan las propiedades utilizadas para los materiales, parte de las mismas se obtuvieron de los ensayos de caracterización de hormigón y de las fibras. El resto de las propiedades del hormigón se obtuvieron indirectamente de la simulación de las vigas de hormigón simple ensayadas a flexión de 4 puntos. A partir de allí, se obtuvo la resistencia a tracción y la energía de fractura. Las propiedades necesarias para definir las curvas de arrancamiento se obtuvieron de la simulación del arrancamiento de las mismas y su comparación con ensayos de pull-out. Para calibrar el aporte de los dos mecanismos de disipación (plasticidad y daño) en los distintos materiales se utilizaron las pendientes de las curvas de descarga de los ensayos cíclicos. Con las propiedades calibradas para hormigón y fibras se reprodujeron los ensayos del compuesto a flexión bajo carga monótona creciente y bajo carga cíclica.

Material	Propiedad	
Hormigón	Módulo de elasticidad E [MPa]	42000
	Coeficiente de Poisson ν	0.2
	Resistencia a compresión uniaxial σ^p_c [MPa]	58.19
	Límite elástico en compresión uniaxial σ^0 [MPa]	33.0
	Relación entre límites elásticos en compresión y en tracción R^0	10.0
	Energía de fractura G_f [MPa.mm]	0.11
	Energía de aplastamiento G_c [MPa.mm]	19.00
	Energía de fractura del modelo de daño G^D_f [MPa.mm]	0.03
	Energía de aplastamiento del modelo de daño G^D_c [MPa.mm]	5.00
	Umbral de inicio del daño en compresión σ^0_D [MPa]	33.00
Fibras	Módulo de Elasticidad E [GPa]	210000
	Coeficiente de Poisson ν	0.2
	Límite elástico uniaxial σ^0 [MPa]	5
	Tensión de máxima [MPa]	400
	Densidad de energía g (endurecimiento) [MPa]	0.88
	Energía G (ablandamiento) [MPa.mm]	8000
	Densidad de energía g^D (endurecimiento) en daño [MPa]	4.5
	Energía G^D (ablandamiento) en daño [MPa.mm]	4000

Tabla 4: Propiedades del hormigón y de las fibras

En la [Figura 2](#) se muestra la malla de elementos finitos utilizada para simular los ensayos a flexión, las condiciones de borde y las cargas. Se usaron elementos finitos de tensión plana de 4 nodos y 2x2 puntos de integración. Se estudió la convergencia de la respuesta al refinar la malla llegando a la malla de la [Figura 2](#), que presenta una densificación de los elementos en la zona central donde se espera se produzca la rotura.

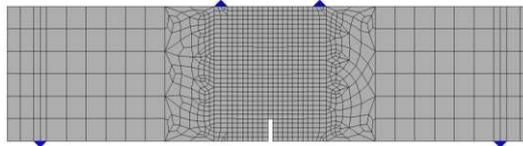


Figura 2: Malla de elementos finitos para los ensayos de flexión.

En la [Figura 3a](#) se muestra la curva de respuesta (carga-deflexión) obtenida numéricamente y su comparación con la curva experimental para el caso de las vigas de hormigón simple (sin fibras). Se puede ver que es posible calibrar los parámetros de hormigón para reproducir con bastante precisión la respuesta experimental en flexión. En la [Figura 3b](#) se pueden ver también los mapas de colores correspondientes a las variables de endurecimiento plástico y de daño y se evidencia que la plasticidad es más localizada que la degradación de rigidez.

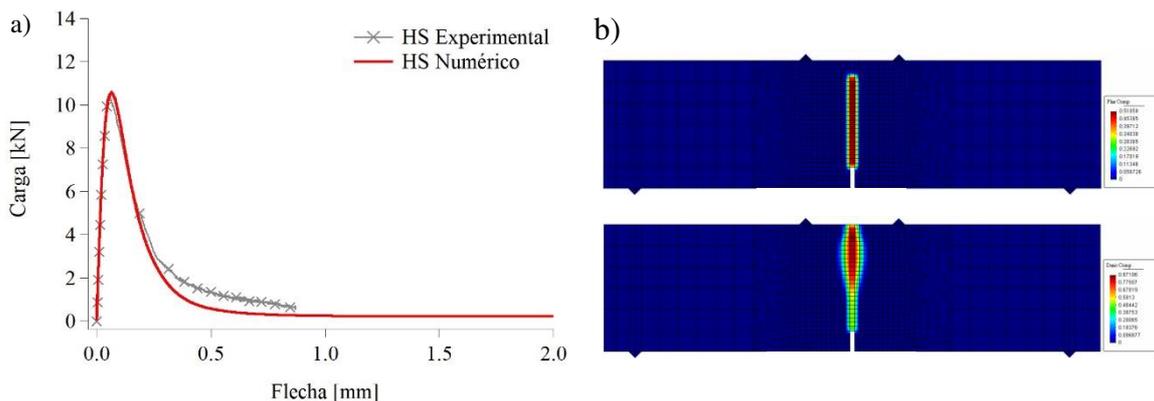


Figura 3. Respuesta a flexión de vigas de hormigón simple (HS): a) Comparación de respuesta numérica y experimental; b) Variable de endurecimiento plástico y de daño al finalizar ensayo

En la [Figura 4](#) se compara la respuesta a flexión bajo carga monótona de dos vigas de HRF con dos contenidos reales distintos de fibras, 25 y 50 kg/m³, con las obtenidas numéricamente para esos contenidos de fibras. Se observa que el modelo logra reproducir el comportamiento del compuesto a partir de los modelos calibrados para las componentes. En estos casos, la respuesta presenta una cierta zona de ablandamiento, pero luego, la capacidad de carga se mantiene debido al efecto beneficioso de las fibras. La resistencia residual aumenta con el contenido de fibras.

En la [Figura 5](#) se muestran los mapas de colores correspondientes a las variables de endurecimiento plástico y de daño correspondientes al compuesto (HRF) en el último paso de carga simulado de una viga con 50 kg/m³ de acero. Se puede ver que la plasticidad es más localizada que la degradación de rigidez y la diferencia es más marcada que en el caso de hormigón simple ([Figura 3b](#)).

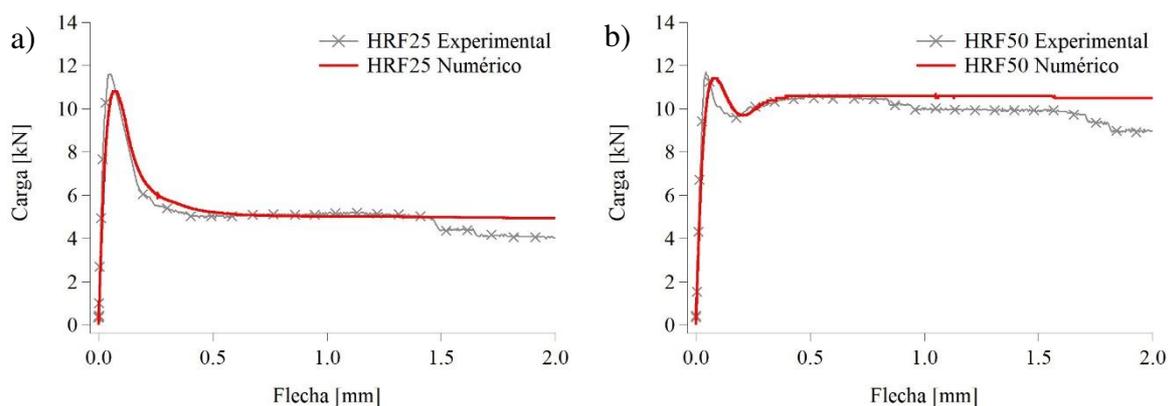


Figura 4: Respuesta a flexión de vigas de HRF. Comparación de resultados numéricos y experimentales: a) 25 kg/m³; b) 50 kg/m³

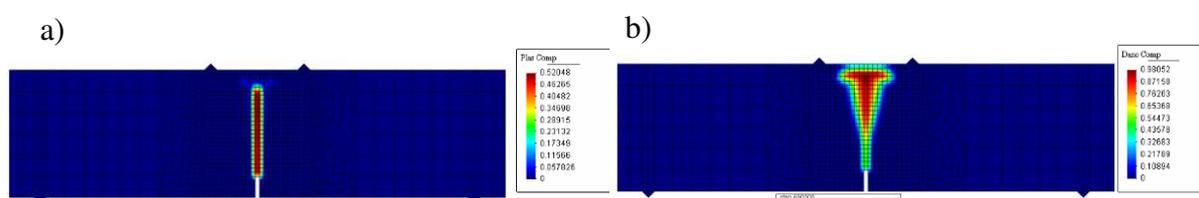


Figura 5: Variables de endurecimiento HRF con 50 kg/m³: a) Plasticidad; b) Daño

En la [Figura 6](#) se muestran las curvas de respuesta obtenidas experimentalmente para una viga de HRF con contenido real de fibras de 40kg/m³, sometida a flexión con ciclos de carga y descarga y los resultados de la simulación numérica en la que solo se han representado algunos de los ciclos realizados experimentalmente. Los resultados experimentales muestran que en estos ensayos la curva cíclica tiene por envolvente a la curva de carga monótona, razón por la cual se puede justificar la simplificación a los efectos de reducir el tiempo de cálculo. La primera rama de descarga fue utilizada para calibrar los parámetros del modelo de daño de la matriz que es la principal responsable de la degradación de rigidez observada en esa descarga. La segunda descarga permitió calibrar los parámetros de daño en el modelo de las fibras. Luego se continuó con la simulación y se reprodujo otro ciclo de descarga. Se observa que la respuesta numérica reproduce adecuadamente la degradación de rigidez obtenida experimentalmente.

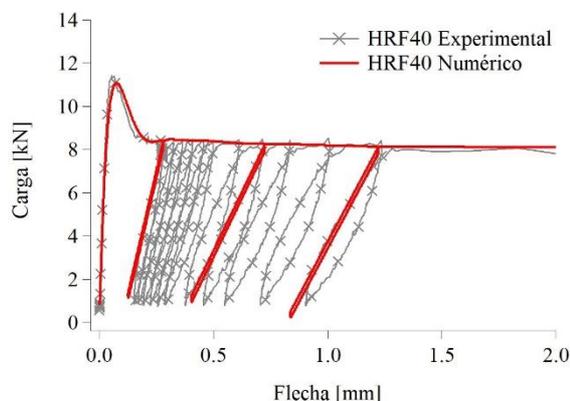


Figura 6: Respuesta a flexión cíclica de viga de HRF con 40 kg/m³ de fibras. Comparación de resultados numéricos y experimentales.

En la [Figura 7a](#) se pueden ver las curvas de respuesta cíclica obtenidas con el mismo modelo calibrado, para tres contenidos distintos de fibras. La comparación muestra claramente la influencia de las fibras en la rigidez de las descargas. En coincidencia con lo observado experimentalmente (ver [Figura 7b](#)), con el aumento de contenido de fibras disminuye la degradación de rigidez de las vigas.

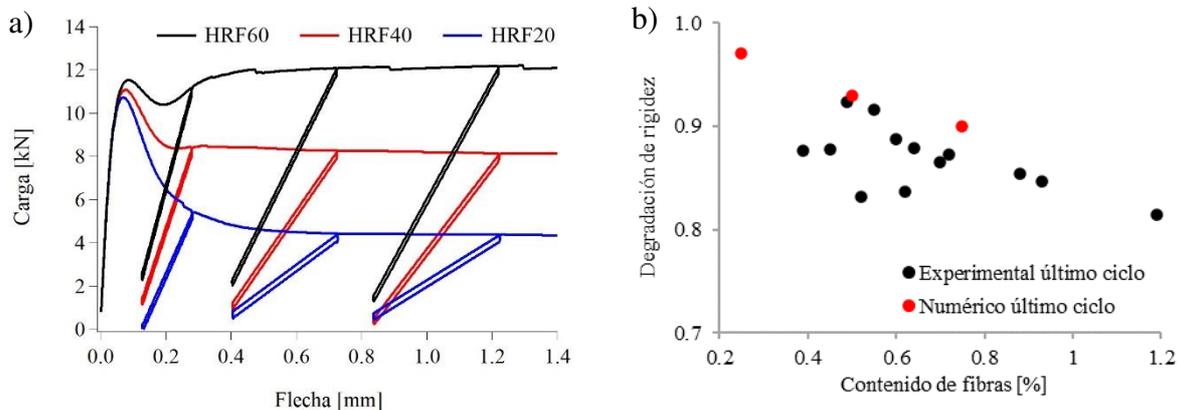


Figura 7: Efecto del contenido de fibras en la respuesta a flexión cíclica de viga de HRF: a) Comparación de respuestas para distintos contenidos de fibras; b) Efecto del contenido de fibras en la degradación de rigidez

5 CONCLUSIONES

El modelo de compuesto elastoplástico con daño presentado para HRF, considera el aporte de las componentes del material (hormigón y fibras) a los distintos fenómenos inelásticos que intervienen en la respuesta. Calibrando adecuadamente las propiedades de las componentes, el modelo logra reproducir el comportamiento en flexión y las ramas de descarga, evidenciando la degradación de rigidez del material.

La calibración del daño requiere contar con resultados experimentales que incluyan descargas. Apenas producida la fisuración, la degradación del compuesto depende más de la degradación de la matriz de hormigón que de las fibras, mientras que, a medida que crecen los desplazamientos, la degradación de rigidez del proceso de arrancamiento de las fibras tiene más influencia en la rigidez del compuesto. Dicha observación facilita la calibración del modelo.

El modelo calibrado, logra captar el efecto beneficioso de aumentar el contenido de fibras, tanto en la resistencia y ductilidad, como en la rigidez, lo cual se pone de manifiesto en los ensayos de carga/descarga.

La respuesta numérica prácticamente no evidencia lazos de histéresis en el proceso de carga/descarga. Para poder reproducir los lazos de histéresis en estos ensayos de carga y descarga en que los signos de las tensiones no cambian en las componentes del compuesto, hace falta un modelo de endurecimiento cinemático más complejo que los que se usan normalmente para metales o la utilización de modelos elásticos no lineales que permitan descargas no lineales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Nacional de Tucumán (PIUNT E727), al CONICET y a la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación (PICT 2020 1810) por el apoyo económico brindado.

REFERENCIAS

- Argañaraz, P.L., Luccioni, B., Isla, F., Benito, A., Torrijos, M.C., Giaccio, G. y Zerbino, Modelación del comportamiento cíclico de hormigón reforzado con fibras, *Mecánica Computacional*, XXXV:1843-1858, 2017.
- Buratti, N., Mazzotti, C. and Savoia, M., Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic concretes. *Construction and Building Materials*, 25:2713–2722, 2011.
- Caggiano, A., Cremona, M., Faella, C., Lima, C. and Martinelli E., Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers, *Construction and Building Materials* 37: 832-840, 2012.
- CEN-European Committee for Standardization, *EN 14651:2005 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*, Brussels, 2005.
- Giaccio, G., Tobes, J.M. and Zerbino, R., Use of small beams to obtain design parameters of fibre. *Construction and Building Materials* 25(5): 2713-2722, 2011.
- González, D.C., Vicente, M. A. and Ahmad, S., Effect of Cyclic Loading on the Residual Tensile Strength of Steel Fiber–Reinforced High-Strength Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9): 04014241, 2015.
- González, D.C., Moradillo, R., Mínguez, J., Martínez, S. and Vicente, M.A., Postcracking residual strengths of fiber-reinforced high-performance concrete after cyclic loading. *Structural Concrete*. 19: 340–351, 2018.
- Han, T-S., Feenstra, P. and Billington, S., Simulation of highly ductile fiber-reinforced cement based composite components under cyclic loading. *ACI Structural Journal*, 100(6): 749-757, 2003.
- Isla, F., Argañaraz, P. and Luccioni B., Numerical modelling of steel fibers pull-out from cementitious matrixes. *Construction and Building Materials*, 332: 12737, 2022.
- Kesner, K., Billington, S. and Douglas, K., Cyclic response of highly ductile fiber-reinforced cement-based composites, *ACI Materials Journal*, 100(5): 381-390, 2003.
- Khan, M. I., Al-Osta, M.A., Ahmad, S. and Rahman, M. K., Seismic behavior of beam-column joints strengthened with ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Composite Structures*, 200:103–119, 2018.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Oñate, E., A plastic damage model for concrete. *International Journal for Solids and Structures*, 25(3):299-326, 1989.
- Luccioni, B., Oller, S. y Danesi, R., Coupled Plastic-Damaged Model. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 129:81-89, 1996.
- Shannag, M. J. and Alhassan, M.A., Seismic upgrade of interior beam-column sub assemblages with high-performance fiber-reinforced concrete jackets. *ACI Structural Journal* 102(1): 131- 138, 2005.
- Ruano, G., Isla, F. and Luccioni, B., Numerical modeling of reinforced concrete beams repaired and strengthened with SFRC. *Engineering Structures*, 86:168-181, 2015.
- Tong, T., Yuan, S., Zhuo, W., He, Z. and Liu, Z., Seismic retrofitting of rectangular bridge piers using ultra-high performance fiber reinforced concrete jackets. *Composite Structures*, 228: 111367, 2019.
- Wang, Y. and Lee, M., Ultra-high strength steel fiber reinforced concrete for strengthening of RC frames. *Journal of Marine Science and Technology*, 15(3), 210-218, 2017.
- Zhang, J., Stang, H. and Li, V.C. Fatigue life prediction of fiber reinforced concrete under flexural load. *International Journal of Fatigue*, 21: 1033-1049, 1999.