

ENCAMISADO DE ESTRUCTURAS EXISTENTES UTILIZANDO HORMIGON REFORZADO CON FIBRAS

Etienot, Sebastián¹; Folino, Paula¹; Ripani, Marianela¹; Xargay, Hernán^{1,2}

Ing. Civil; Dra. Ing. Civil; Dra. Ing. Civil; Esp. Ing. Civil

¹ Laboratorio de Métodos numéricos en ingeniería (LMNI). Laboratorio de Materiales y Estructuras (LAME). Facultad de Ingeniería UBA (FIUBA). INTECIN-CONICET.

² Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA).

E-mail: pfolino@fi.uba.ar

RESUMEN

La mejora de las técnicas de reparación y refuerzo de estructuras existentes de hormigón armado es un tema de gran interés en Ingeniería Civil, ya que, una gran parte del trabajo en el área de la construcción implica intervenciones en estructuras existentes. Este trabajo forma parte de una investigación experimental que estudia técnicas de refuerzo de elementos estructurales de hormigón armado existentes mediante el encamisado con Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras (SCFRC), tanto a temperatura ambiente como después de ser expuestos a altas temperaturas. Los resultados de la campaña experimental, donde se analizaron distintos espesores de encamisados y con distintos tratamientos superficiales, muestran que el SCFRC permite encamisados más delgados respecto al hormigón estándar. Particularmente en este trabajo se estudia una metodología para el cálculo de secciones reforzadas con encamisados de FRC, y se comparan los resultados analíticos con los obtenidos experimentalmente.

ABSTRACT

The enhancement of repair and strengthening techniques for existing reinforced concrete structures is a subject of considerable interest within the field of Civil Engineering, given that a substantial portion of construction work entails interventions on existing structures. This work forms part of an experimental research aimed at studying reinforcement techniques for reinforced concrete structural elements utilizing the jacketing technique, and employing Self-Compacting Fiber Reinforced High Strength Concrete (SCFRC), both at ambient temperature and exposure to high temperatures. The results of the experimental campaign, which analyzed different encasement thicknesses and surface treatments, show that SCFRC facilitates the use of thinner jackets compared to standard concrete. This particular study focuses on a methodology for calculating sections reinforced with FRC jackets, comparing the analytical results with those obtained experimentally.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

La necesidad de aumentar la capacidad portante de estructuras de hormigón armado existentes puede deberse a diferentes situaciones, como un cambio en el destino de la construcción, una adición, un error en el diseño estructural o en la etapa de construcción, una degradación debido a acciones ambientales, o una exposición a un incendio o un impacto. Para solucionar estas situaciones se han desarrollado numerosas técnicas para aumentar la capacidad de las vigas de hormigón armado, como por ejemplo el encamisado de hormigón, el shotcrete, el uso de polímeros reforzados con fibras (FRP) y placas o perfiles de acero, entre muchas otras (Cánovas, 1994¹; Delatte, 2009²; Helene & Pereira, 2003³).

Una técnica que ha mostrado resultados prometedores es el uso de encamisados con hormigón reforzado con fibras de acero, lo que lleva a mejoras en la durabilidad y la adherencia entre el hormigón nuevo y el existente (Ruano et al., 2014⁴; Martinola et al., 2007⁵), y dado que puede llegar a prescindirse del uso de armaduras, el espesor está limitado por la longitud de las fibras y el contenido volumétrico (Folino et al., 2020⁶), con valores mínimos que alcanzan hasta 30 mm (Gholampour et al., 2019⁷). Además, este material presenta una buena resistencia a la corrosión y mayor mitigación de la fisuración en comparación con otros métodos (Xargay et al., 2018⁸).

En el Laboratorio de Métodos Numéricos en Ingeniería (LMNI) de la Facultad de Ingeniería UBA, se está llevando a cabo un estudio experimental que busca comparar diferentes alternativas para reforzar vigas de hormigón armado utilizando encamisados de SCFRC.

Recientemente se completó la primera etapa de la campaña, en la que se evaluó el desempeño de este tipo de refuerzos en vigas con un déficit de capacidad a corte, variando espesores de camisa y tipo de preparación superficial, y comparándolos con otras metodologías de refuerzo. Los resultados preliminares de este estudio indican que los encamisados de SCFRC resultan eficientes para el refuerzo de vigas, restando aún evaluar el comportamiento frente a la acción de alta temperatura.

Respecto a la forma de evaluación numérica de la resistencia, actualmente se encuentra ampliamente aceptada la metodología para el cálculo de las secciones transversales de hormigón reforzado con fibras, como se describe en las recomendaciones RILEM-TC-162⁹ o el Model Code CEB-FIP 2010¹⁰. Sin embargo, estas directrices no contemplan el refuerzo de elementos estructurales existentes. Por otro lado, además de los métodos de elementos finitos que pueden encontrarse en la literatura (Banjara & Ramanjaneyulu, 2019¹¹; Kadhim et. al, 2022¹²), se han propuesto métodos simplificados como los desarrollados por Alhadid & Youssef, 2017¹³, Thermou et. al, 2007¹⁴ and Guades et. al, 2021¹⁵.

En este trabajo se presenta un método simplificado para evaluar numéricamente la resistencia de vigas encamisadas mediante hormigón reforzado con fibras, basado en las recomendaciones del Model Code CEB-FIP 2010, comparándolo con los resultados experimentales obtenidos de la campaña del LMNI.

Organiza:

CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La campaña experimental comprendió la elaboración de vigas de hormigón armado de referencia para luego ser reforzadas mediante encamisadas. Dichas vigas fueron moldeadas con hormigón de resistencia normal (NSC) elaborado por una empresa local, con una resistencia característica objetivo de 40 MPa.

Para las vigas de referencia sin encamisado se adoptó una sección transversal de 150x200 mm y una longitud total de 1200 mm, con una armadura inferior de 2 Φ 12, superior de 2 Φ 6 y, debido a que fueron diseñadas estructuralmente para fallar por corte, solo tres estribos constructivos Φ 6 ubicados en los extremos y en el centro de la viga, como se muestra en la Fig. 1a.

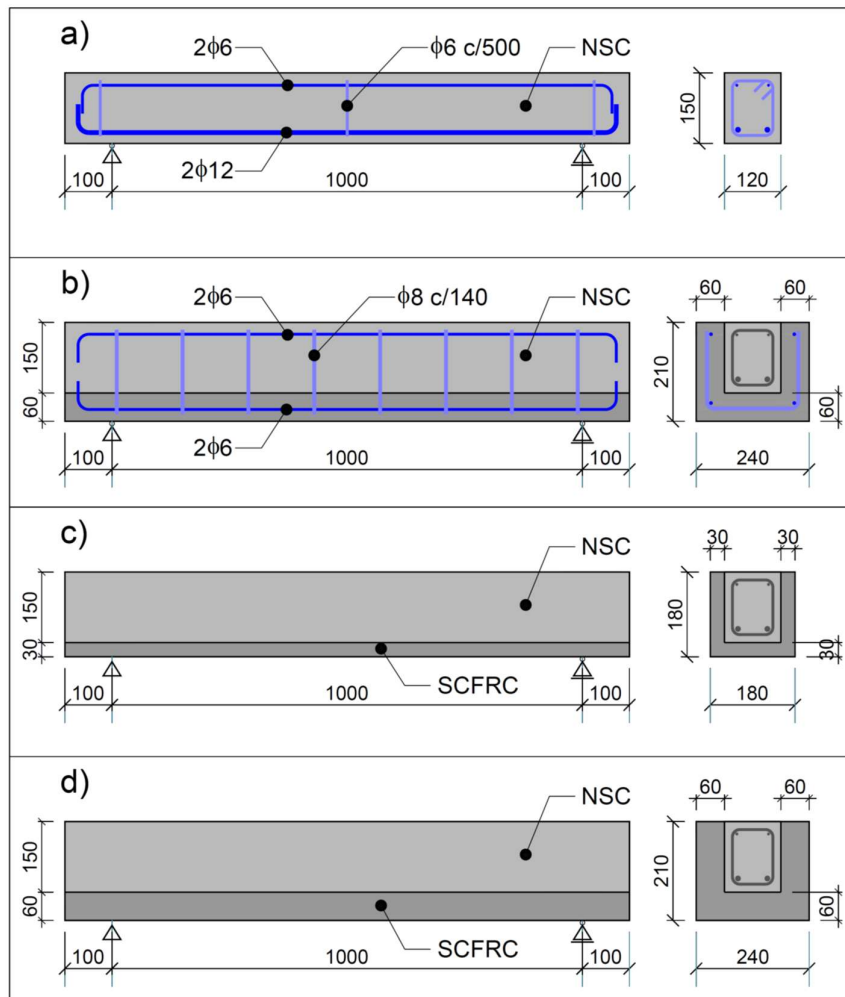


Figura 1. (a) Vigas de referencia; (b) vigas encamisadas con SCC de 60mm; (c) vigas encamisadas con SCFRC de 30mm; (d) vigas encamisadas con SCFRC de 60mm.

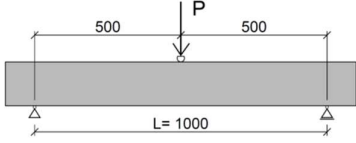
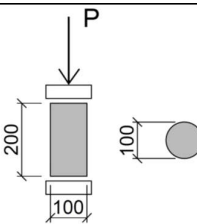
Organiza:

Posteriormente, las vigas de referencia de NSC fueron reforzadas con encamisados en forma de U, envolviendo las caras laterales e inferiores de las vigas, considerando dos tipos de hormigón autocompactante, sin fibras (SCC) y reforzado con fibras (SCFRC), de acuerdo al siguiente detalle:

- Encamisados de 60 mm de espesor de SCC con 8 estribos $\Phi 8$ y 4 barras de refuerzo $\Phi 6$ (ver Fig. 1b).
- Encamisados de 60 mm de espesor de SCFRC (ver Fig. 1d).
- Encamisados de 30 mm de espesor de SCFRC (ver Fig. 1c).

Para los refuerzos se consideraron dos tipos de condición superficial de las vigas de referencia. En un caso, se removió la capa exterior de hormigón hasta que los agregados gruesos quedaron expuestos, logrando una superficie rugosa, mientras que en el otro caso no se aplicó ningún tratamiento, manteniendo la superficie original lisa.

Además de las vigas y sus encamisados, se moldearon especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura con cada uno de los hormigones utilizados para someterlos a ensayos de compresión uniaxial (UC), tracción por compresión diametral (ST) y slant-shear (SS), así como prismas de 550 mm de longitud y sección transversal de 150x150 mm con una muesca de 25 mm en el medio, para ensayo de flexión en tres puntos (TPB). Un resumen de los especímenes y los tipos y disposiciones de los ensayos se muestra en la Tabla 1.

Espécimen	Cant.	Ensayo	Esquema de Ensayo
Viga 150x150x1200 NSC	3	TPB	
Viga 150x150x1200 U30 SCFRC	3		
Viga 150x150x1200 U30 SCFRC RS	3		
Viga 150x150x1200 U60 SCFRC	2		
Viga 150x150x1200 U60 SCFRC RS	2		
Viga 150x150x1200 U60 SCC RS	2		
Cilindro 100x200 NSC	3	UC	
Cilindro 100x200 SCFRC	3		

Organiza:

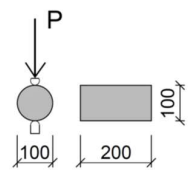
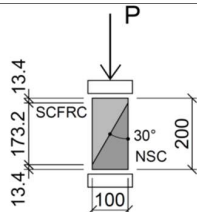
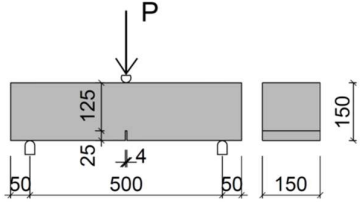
Cilindro 100x200 NSC	3	ST	
Cilindro 100x200 SCFRC	3		
Cilindro 100x200 NSC/SCFRC	3	SS	
Prisma 150x150x550 SCFRC	2	TPB	

Tabla 1 – Ensayos de especímenes

Los resultados de los ensayos de compresión uniaxial (UC), tracción por compresión diametral (ST), slant-shear (SS) y flexión de tres puntos en prismas (TPB) se resumen en la Tabla 2, mientras que los resultados obtenidos para vigas con y sin encamisado se detallan en la Tabla 3.

ENSAYO	VARIABLE	UNIDAD	NSC	SCC	SCFRC
UC	f'_c	[MPa]	45.81	74.21	62.48
	ε_0	[%]	-	2.228	2.431
	E	[MPa]	-	41880	36081
ST	f_{t-st}^1	[MPa]	4.82	6.47	4.35
	f_{t-st}^2	[MPa]	-	-	9.45
SS	f'_{c-ss}	[MPa]	-	-	24.70
	ν_{ss}	[MPa]	-	-	10.70

Organiza:

TPB	f_{t-TPB}^{Peak}	[MPa]	-	-	5.63
	f_L^{FL}	[MPa]	-	-	3.81
	$f_{R,1}^{CMOD=0.50}$	[MPa]	-	-	5.25
	$f_{R,2}^{CMOD=1.50}$	[MPa]	-	-	4.96
	$f_{R,3}^{CMOD=2.50}$	[MPa]	-	-	4.72
Referencias: resistencia a compresión (f'_c), deformación axil pico (ε_0), módulo de Young (E), 1° tensión pico (f_{t-st}^1), 2° tensión pico (f_{t-st}^2), resistencia a compresión en ensayo SS (f'_{c-ss}), tensión de adherencia (v_{ss}), tensión pico TPB (f_{t-TPB}^{Peak}), tensión límite proporcional (f_L^{FL}), tensiones residuales ($f_{R,i}^{CMOD}$).					

Tabla 2 – Resultados de probetas cilíndricas y prismáticas

Espécimen	Espesor camisa [mm]	Tipo encamisado	Preparación superficial	Carga máxima [kN]	Momento pico [kNm]	Flecha [mm]
V69	-	-	-	47.8	12.0	7.7
V70				50.3	12.6	8.4
V90				47.5	11.9	7.2
V79	60	SCC	Rugosa	116.7	29.3	13.4
V80				130.1	32.7	17.6
V78	30	SCFRC	Rugosa	88.9	22.3	13.8
V83				88.7	22.3	17.6
V87				91.4	23.0	8.1
V73	30	SCFRC	Lisa	83.7	21.0	7.3
V86				84.4	21.2	14.1
V88				87.0	21.9	6.9
V72	60	SCFRC	Rugosa	88.9	22.4	7.2
V74				117.5	29.5	6.8
V68	60	SCFRC	Lisa	98.4	24.8	7.0
V75				105.7	26.6	6.8

Tabla 3 – Resultados de ensayos de vigas con y sin encamisado

Organiza:

MODELO NUMÉRICO SIMPLIFICADO

Para el enfoque propuesto se asume adherencia perfecta entre la capa de revestimiento y la viga original, una distribución lineal de las deformaciones y un diagrama tensión-deformación rígido-plástico para el hormigón reforzado con fibras.

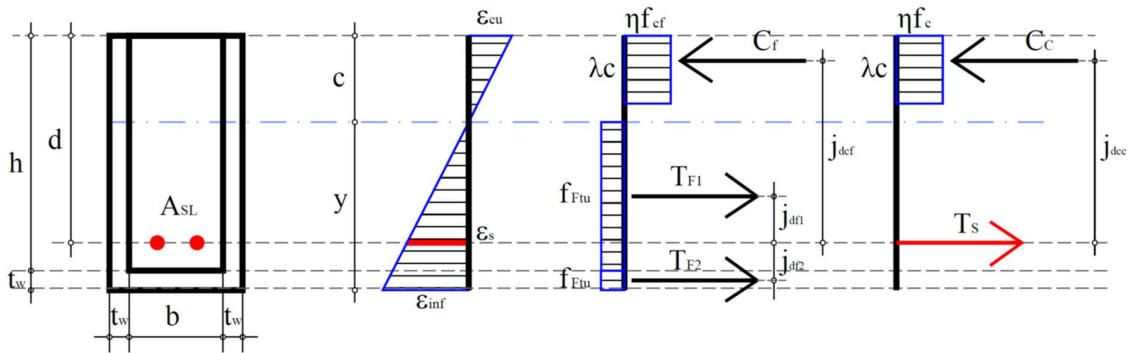


Figura 2. Deformaciones, tensiones y fuerzas en la sección analizada.

Resistencia a Flexión

Las distribuciones de tensiones en la viga original y el revestimiento se asumen como se muestra en la Figura 2, con las fuerzas actuantes en la sección y sus respectivos brazos de palanca determinados por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 C_c &= \lambda_c c \eta_c f'_c & j_{dcc} &= d - \frac{\lambda_c c}{2} \\
 C_{cf} &= \lambda_c c \eta_c f'_{cf} & j_{dcf} &= d - \frac{\lambda_c c}{2} \\
 T_s &= A_s f_s & - & \\
 T_{f1} &= f_{FTu} 2 t_w (h - c) & j_{df1} &= d - c - \frac{h - c}{2} \\
 T_{f2} &= f_{FTu} t_w (b + 2 t_w) & j_{df2} &= h - d + t_w
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

donde λ_c y η_c son factores que definen la altura y la resistencia efectivas en la zona de compresión, f'_c es la resistencia a compresión del NSC, f'_{cf} es la resistencia a compresión del SCFRC, A_s es el área total de armadura inferior, f_s es la tensión de

Organiza:

fluencia del acero, c es la altura de la zona de compresión, y h , d , b , t_w son las dimensiones de la sección transversal.

La resistencia última a la tracción del SCFRC para un diagrama tensión-deformación rígido-plástico se define como:

$$f_{FTu} = f_{R,3}/3 \quad (2)$$

Planteando el equilibrio de fuerzas en la sección se obtiene la ecuación (3) en función de c y de las deformaciones límites del hormigón con y sin fibras.

$$N_n = C_c + C_{cf} - T_s - T_{f1} - T_{f2} \quad (3)$$

Planteando distintos planos de deformación e iterando es posible determinar el valor de c y con este los valores de las distintas componentes y sus brazos, y con ellos se determina el momento nominal de flexión:

$$M_{n,b} = C_c j_{dcc} + C_{cf} j_{dcf} + T_{f2} j_{df2} - T_{f1} j_{df1} \quad (3)$$

Para validar la hipótesis de adherencia perfecta entre el encamisado y la viga original, la tensión resultante en la interfaz (v_{uh}) no debe exceder la tensión de adherencia (v_{ss}) determinada mediante el ensayo SS:

$$v_{uh} = \frac{2 (T_{f1} + T_{f2})}{L_v b (h - c)} \leq v_{ss} \quad (4)$$

En el caso de los resultados experimentales, los valores calculados para los tipos de encamisados de SCFRC de 30 y 60 mm fueron 0.11 MPa y 0.36 MPa, respectivamente, los cuales son sustancialmente inferiores a los 10.7 MPa obtenidos en el ensayo SS, sugiriendo que la hipótesis de adherencia perfecta es válida.

Resistencia al Corte

Para la resistencia al corte sólo se consideran las contribuciones del NSC y el SCFRC, sin tener en cuenta el efecto arco, la trabazón de agregados, ni los estribos. La resistencia nominal al corte (V_n) es la suma de la resistencia al corte de la viga original

Organiza:

(V_{nc}) más la resistencia al corte aportada por el encamisado de SCFRC (V_{ncf}), calculada mediante las siguientes ecuaciones:

$$V_{nc} = 0.18 k (100 \rho_l f_c)^{1/3} b d \quad (5)$$

$$V_{ncf} = 0.18 k [100 \rho_l (1 + \frac{f_{FTu}}{f_{tk,f}}) f_{cf}]^{1/3} 2 t_w h \quad (6)$$

$$V_n = V_{nc} + V_{ncf} \quad (7)$$

donde ρ_l es la relación de refuerzo para el refuerzo longitudinal (A_{sl}/bd), $f_{tk,f}$ es la resistencia a la tracción del SCFRC, y k es un factor que tiene en cuenta el efecto de tamaño y se determina como:

$$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2 \quad (8)$$

El momento nominal debido al corte ($M_{n,s}$) se puede determinar como:

$$M_{n,s} = \frac{2 V_n L_v}{4} \quad (9)$$

Evaluación de Resultados

En la Figura 3, se presentan los momentos nominales $M_{n,b}$ y $M_{n,s}$ determinados según la metodología presentada calculados para espesores de encamisado de 30 a 80 mm en vigas de igual sección a las de referencia de la campaña experimental. Asimismo, se grafican los momentos pico (M_p) correspondientes a los resultados experimentales.

De estos resultados se observa que la metodología propuesta arroja estimaciones conservadoras en comparación con los datos experimentales, lo que sugiere que el método simplificado se puede utilizar de manera segura para estimar la capacidad última a flexión de vigas de hormigón reforzadas con encamisados de SFRC.

Organiza:

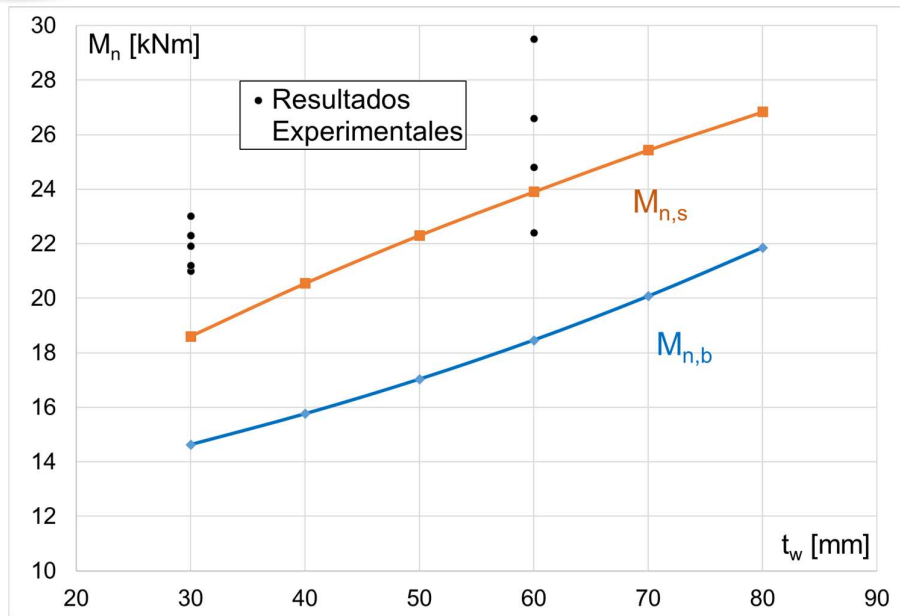


Figura 3. Comparativa de resultados numéricos y experimentales para distintos espesores de encamisado

CONCLUSIONES

A partir del estudio experimental y el desarrollo de un modelo numérico simplificado para evaluar la capacidad de vigas de hormigón armado con encamisados de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC), se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El modelo numérico simplificado basado en las recomendaciones del Model Code CEB-FIP 2010 proporcionó estimaciones conservadoras de la capacidad de flexión de las vigas reforzadas, validándose así como una herramienta segura para el diseño y evaluación de refuerzos con SFRC.
- Las tensiones de adherencia calculadas en la interfaz entre el encamisado y la viga original fueron sustancialmente menores que la resistencia de adherencia obtenida en los ensayos SS, validando la hipótesis de adherencia perfecta en el modelo simplificado.
- El rango de validez de las conclusiones mencionadas anteriormente se aplica a las condiciones consideradas en este documento: resistencias a compresión de 45 MPa para el RC y 62 MPa para el SCFRC, que contenía 0.75% en volumen de fibras de acero con gancho de 33 mm de longitud y 0.10% de fibras de polipropileno de 12 mm de longitud.
- Es recomendable continuar con investigaciones adicionales para evaluar el comportamiento de las vigas reforzadas con SCFRC bajo otras condiciones de carga, así como la exposición a altas temperaturas y cargas cíclicas, para ampliar la aplicabilidad y confiabilidad de esta técnica de refuerzo.

Organiza:

Agradecimientos: Los autores agradecen sinceramente el apoyo financiero de la Universidad de Buenos Aires a través del Proyecto UBACyT 2023 No. 20020220100185BA. También agradecen sinceramente la valiosa colaboración de las empresas Peri, LOMAX y Maccaferri, así como las contribuciones fundamentales del Prof. Gregorio Pytlowany, Franco Dios, Emanuel Gutierrez Giordanino y Marcelo Net en la campaña experimental.

Referencias:

- [1] Cánovas, M.F.. Patología y terapéutica del hormigón armado. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Servicio de Publicaciones; 1994.
- [2] Delatte, N.. Failure, distress and repair of concrete structures. Elsevier; 2009.
- [3] Helene, P.R., Pereira, F.. Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón reparación, refuerzo y protección. Pini; 2003.
- [4] Ruano, G., Isla, F., Pedraza, R.I., Sfer, D., Luccioni, B. Shear retrofitting of reinforced concrete beams with steel fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials 2014;54:646–658.
- [5] Martinola G, Meda A, Plizzari GA, Rinaldi Z.. An application of high performance fiber reinforced cementitious composites for R/C beams strengthening. In: Proceedings of 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures–FraMCoS; 2007 Jun; Vol. 6. p. 1541-1548
- [6] Folino, P., Ripani, M., Xargay, H., Rocca, N.. Comprehensive analysis of fiber reinforced concrete beams with conventional reinforcement. Engineering Structures 2020;202:109862.
- [7] Gholampour A, Hassanli R, Mills JE, Vincent T, Kunieda M.. Experimental investigation of the performance of concrete columns strengthened with fiber reinforced concrete jacket. Constr Build Mater. 2019;194:51-61.
- [8] Xargay H, Folino P, Sambataro L, Etse G.. Temperature effects on failure behavior of self-compacting high strength plain and fiber reinforced concrete. Constr Build Mater. 2018;165:723-734.
- [9] RILEM-TC-162-TDF, test and design methods for steel fibre reinforced concrete: $\sigma - \epsilon$ design method - final recommendation. Materials and Structures 2003;36(262):560–567.
- [10] Model Code 2010 – Final Draft; vol. 1-2. FIB Bulletin; 2012.
- [11] Banjara, N.K., Ramanjaneyulu, K.. Experimental and numerical study on behaviour of HSFRC overlay strip strengthened flexural deficient RC beams. Engineering Structures 2019;198:109561.
- [12] Kadhim, M.M., Jawdhari, A., Nadir, W., Cunningham, L.S.. Behaviour of RC beams strengthened in flexure with hybrid CFRP-reinforced UHPC overlays. Engineering Structures 2022;262:114356.
- [13] Alhadid, M.M.A., Youssef, M.A.. Analysis of reinforced concrete beams strengthened using concrete jackets. Engineering Structures 2017;132:172–187.
- [14] Thermou, G., Pantazopoulou, S.J., Elnashai, A.. Flexural behavior of brittle RC members rehabilitated with concrete jacketing. Journal of Structural Engineering 2007;133(10):1373–1384.
- [15] Guades, E.J., Stang, H., Schmidt, J.W., Fischer, G.. Flexural behavior of hybrid fibre-reinforced geopolymer composites (FRGC)-jacketed RC beams. Engineering Structures 2021;235:112053.

Organiza: