

7

Estudio de la adherencia de barras *NSM FRP* como refuerzo de estructuras de hormigón

Ibrahim Sharaky y Lluís Torres

Resumen Para la aplicación de los materiales *FRP* (*Fibre Reinforced Polymer*) como refuerzo estructural del hormigón, se han empleado básicamente dos técnicas: el refuerzo con materiales compuestos adheridos externamente, y más recientemente el refuerzo mediante materiales insertados en el recubrimiento (*Near-Surface Mounted* o *NSM*). El comportamiento de la unión depende de la adherencia entre los componentes y la respuesta se ve afectada por diversos parámetros relacionados con las propiedades de los materiales. En este capítulo se presentan los resultados de un estudio experimental del comportamiento adherente del sistema de refuerzo *NSM FRP* aplicado a estructuras de hormigón. En el estudio realizado se ha analizado la influencia de factores como el tipo de adhesivo, el tipo de *FRP*, el tamaño de barra y la longitud de adherencia. Los resultados se presentan en términos del modo de fallo, carga de rotura y factor de eficiencia. El estudio muestra una influencia significativa de los parámetros indicados y de la combinación de los mismos.

7.1. Introducción

La pérdida de funcionalidad de las estructuras de hormigón armado puede ser debida a múltiples factores, ya sea por causa de factores ambientales, daños accidentales, demanda de mayores prestaciones, diseño inadecuado o necesidades de adaptación a cambios normati-

Ibrahim Sharaky

AMADE, Escola Politècnica Superior, Universitat de Girona, Campus Montilivi s/n, 17071 Girona, España
Materials Engineering Dept., Faculty of Engineering, Zagazig University, Zagazig, Sharkia, Egipto

Lluís Torres

AMADE, Escola Politècnica Superior, Universitat de Girona, Campus Montilivi s/n, 17071 Girona, España
e-mail: lluis.torres@udg.edu

DOI: [10.3926/oms.205](https://doi.org/10.3926/oms.205) • Omnia Publisher, 2014

vos. Por todo ello hay una creciente demanda de refuerzo y rehabilitación de las estructuras existentes de hormigón armado, puesto que el coste de demolición y nueva construcción normalmente suele ser mucho mayor que el asociado al refuerzo.

La eficacia de los sistemas de refuerzo de estructuras de hormigón mediante materiales adheridos externamente ha quedado ampliamente demostrada, siendo numerosas las aplicaciones prácticas en las que se ha contemplado el uso de chapas metálicas o armaduras. Más recientemente, se han introducido diversas nuevas técnicas de refuerzo con objeto de aprovechar la ligereza, la alta resistencia a tracción y la resistencia a la corrosión de los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras (*Fibre Reinforced Polymer* o *FRP*). El uso de los *FRP* permite aprovechar estas propiedades para obtener una mayor rapidez y facilidad de instalación, menor peso y mayor durabilidad. La mayor desventaja es su mayor coste que sin embargo puede verse compensado si se atiende al ciclo de vida.

No obstante, para una correcta utilización de los *FRP* en el refuerzo estructural, es importante tener un conocimiento adecuado sobre sus propiedades y sobre su comportamiento cuando se aplican empleando distintas técnicas. Los *FRP* son materiales compuestos a base de fibras (carbono, vidrio, aramida, basalto) embebidas en una matriz polimérica (epoxi, viniléster, poliéster) y se presentan en formatos muy diversos, ya sean tejidos, láminas o barras.

Una de las técnicas más utilizadas para el refuerzo estructural con *FRP* ha consistido en la aplicación del material de refuerzo adherido a la superficie externa de la pieza. Este sistema ha sido empleado en múltiples aplicaciones de refuerzos a flexión, cortante o confinamiento de elementos a compresión. No obstante, diversas investigaciones han puesto de manifiesto que en ocasiones la aplicación de refuerzo externo no permite movilizar de manera suficientemente efectiva la resistencia a tracción de los materiales compuestos por una insuficiente capacidad adherente. Por otra parte, el material aplicado en la superficie exterior queda expuesto a posibles daños ocasionados por efectos ambientales o vandalismo. Otra posible técnica de refuerzo de estructuras de hormigón con *FRP* (aplicable asimismo a estructuras de madera o de obra de fábrica) consiste en la instalación de barras o láminas de material compuesto insertadas en el recubrimiento de las armaduras (*Near-Surface Mounted* o *NSM*). Con ello se puede mejorar el comportamiento adherente al aumentar la superficie de contacto, así como la protección frente a acciones externas al quedar el material embebido en el elemento de hormigón. Sin embargo, el comportamiento adherente sigue siendo uno de los aspectos clave en el diseño del refuerzo, puesto que en la mayoría de los casos se produce el fallo por adherencia. En el comportamiento adherente de los refuerzos mediante la técnica *NSM FRP*, intervienen diversos factores ligados a las propiedades de los materiales involucrados (*FRP*, adhesivo y hormigón) y a los detalles constructivos relacionados con la instalación, siendo por tanto un fenómeno complejo sobre el que son necesarios estudios que aporten datos que permitan una mayor comprensión del mismo.

En este capítulo se presenta un estudio experimental de la adherencia del sistema *NSM FRP* para el refuerzo de elementos de hormigón en el que se ha analizado el efecto de distintos factores como el tipo de adhesivo, el tipo de *FRP*, el tamaño de la barra y la longitud de adherencia. En una primera parte se hace una breve introducción y revisión del estado de la técnica, a continuación se describe la campaña experimental y se analizan los resultados. Finalmente se presentan las conclusiones y se proponen unas líneas futuras de desarrollo.

7.2. Estado de la técnica

El refuerzo de estructuras de hormigón mediante barras de material compuesto de polímeros reforzados con fibras insertadas en el recubrimiento *NSM FRP*, se presenta como una alternativa efectiva para el refuerzo de estructuras de hormigón armado, obra de fábrica o madera. Mediante esta técnica el material compuesto se inserta en ranuras practicadas en las caras accesibles del elemento estructural y se adhiere al sustrato mediante el correspondiente adhesivo. En el caso de estructuras de hormigón, las ranuras se practican en la zona de recubrimiento de las armaduras. La técnica *NSM FRP* ha sido usada en múltiples aplicaciones prácticas y ha sido asimismo objeto de creciente interés por parte de la comunidad científica, debido a las potenciales ventajas con respecto al refuerzo con materiales compuestos adheridos en la superficie externa de la pieza [2, 4, 6, 7, 12, 18, 19, 23]. Entre las ventajas que se han destacado de la técnica *NSM FRP* sobre el refuerzo externo, cabe indicar las siguientes:

- No se requiere preparación superficial complementaria más allá de la ejecución de las ranuras.
- Se mejora la protección del material de refuerzo frente a agentes externos, daños mecánicos, impactos, fuego o vandalismo.
- Se mejora el comportamiento adherente entre refuerzo y hormigón.
- Se facilita la posibilidad de pretensado.
- La estética de la estructura reforzada no se ve prácticamente alterada [4, 6, 12].

Por otra parte el uso de materiales compuestos presenta algunas ventajas con respecto a los refuerzos de acero como pueden ser el menor peso, facilidad de manejo y rapidez de instalación y alta durabilidad.

Aun cuando el comportamiento adherente mejora considerablemente con respecto a los sistemas de refuerzo externo, éste sigue siendo todavía un aspecto fundamental en el diseño de los elementos reforzados con *NSM FRP*. En este sentido, debe tenerse en cuenta que la adherencia puede verse influenciada por diversos factores como son: las propiedades del material *FRP* empleado, el tratamiento superficial del *FRP*, la sección del refuerzo, la geometría de la ranura y su superficie, el tipo de adhesivo o las características del hormigón. Estas propiedades pueden incidir en las dos interfases en las que se lleva a cabo la transmisión de esfuerzos por adherencia: *FRP*-adhesivo y adhesivo-hormigón [6].

Para el estudio de la adherencia de los sistemas *NSM FRP* se pueden emplear varias metodologías siendo las más usuales los ensayos de *pull-out* o los de *beam-test* para los que se han propuesto diversas configuraciones [8]. El ensayo de *pull-out* ha sido quizás el más utilizado para analizar el comportamiento adherente del *NSM FRP* [3, 5, 9, 11, 13–17] y más concretamente la denominada configuración modificada, debido a su simplicidad [3, 5, 9, 14, 17].

7.3. Estudio experimental

A continuación se presenta un estudio experimental de la adherencia del sistema *NSM FRP* para el refuerzo de elementos de hormigón en el que se ha analizado el efecto de distintos

factores como el tipo de adhesivo, el tipo de FRP, el tamaño de la barra y la longitud de adherencia. Se ha ensayado un formato de barras de fibra de carbono (*Carbon Fibre Reinforced Polymer* o CFRP) de 8 mm de diámetro para al que se ha asignado la denominación C1, y dos formatos de barras de fibra de vidrio (*Glass Fibre Reinforced Polymer* o GFRP) de 8 y 12 mm de diámetro, cuyas denominaciones han sido G1 y G2, respectivamente. El tamaño de ranura fue de $16 \times 16 \text{ mm}^2$, excepto para los especímenes con barras G2 en los que fue de $18 \times 18 \text{ mm}^2$.

El criterio usado para la identificación de las probetas ha sido el siguiente: el primer carácter indica la longitud de adherencia (S=48 mm, M=96 mm, L=192 mm y T= 240 mm); las dos posiciones siguientes indican las dimensiones de ranura en mm; a continuación se indica el tipo de adhesivo (A, B y D); el siguiente carácter muestra el tipo de barra (C= fibra de carbono, G= fibra de vidrio, 1= tipo 1, 2= tipo 2); y finalmente se detalla el espécimen (a, b, c) de entre las probetas similares ensayadas para cada configuración (véase la primera columna en las Tablas 7.2 y 7.3).

Se ensayaron 38 especímenes usando la configuración del ensayo de *pull-out* modificado que se muestra en la Figura 7.1. Las ranuras se ejecutaron realizando dos cortes paralelos con disco, completándose la geometría mediante herramientas manuales. Se limpiaron con aire comprimido y se procedió a la colocación y adhesión del refuerzo. Se usó el mismo tipo de hormigón para todos los especímenes, con una resistencia media a compresión de 23 MPa y a tracción de 2,3 MPa, determinada sobre probetas cilíndricas normalizadas según UNE-EN 12390-3 [20] y UNE-EN 12390-6 [21].

En este estudio se han usado dos tipos básicos de resina epoxi: (A) MBRACE ADHESIVE HT (BASF) y (B) POLYFIXER EP (Roberlo). El tercer tipo de resina empleado en los ensayos (D) se obtuvo modificando la resina (B) con la adición de un 3,76 % en peso de *Polypropylene glycol diglycidyl ether* (Grilonit[®] F 704). Las propiedades de los adhesivos se determinaron según las normas ISO-527-1 [10] y UNE-EN 13412 [22]. Las propiedades mecánicas de las barras de fibra de carbono y de fibra de vidrio se obtubieron según la norma ACI 440.3R-04 [1]. El acabado superficial de las barras se muestra en la Figura 7.2. La Tabla 7.1 recoge los resultados de la caracterización de los materiales utilizados en el estudio.

Hormigón	Resistencia media a compresión (MPa)	23			UNE-EN 12390-3 [20]
	Resistencia media a tracción (MPa)	2,3			UNE-EN12390-6 [21]
	Tipo	A	B	D	
Resina epoxi	Módulo de elasticidad (MPa)	5761	8000	6900	ISO 527-1 [10]
	Resistencia a compresión (MPa)	70,2	95,5	84,8	UNE-EN13412 [22]
	Resistencia a tracción (MPa)	28,9	23,0	21,0	ISO 527-1 [10]
		<i>CFRP</i>	<i>GFRP</i>		
Barras FRP	Módulo elástico (E_f) (GPa)	170	64		ACI 440.3R-04 [1]
	Resistencia a tracción (f_{fu}) (MPa)	2350	1350		ACI 440.3R-04 [1]

Tabla 7.1: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en el estudio.

En los ensayos se utilizó una máquina de ensayos servo hidráulica con control de desplazamiento con una velocidad de 0,003 mm/s. Para la medida de los desplazamientos y

determinación de los deslizamientos se usaron 2 transductores *LVDT* acoplados al extremo cargado de la barra y uno en el extremo libre (véase Figura 7.1 derecha).

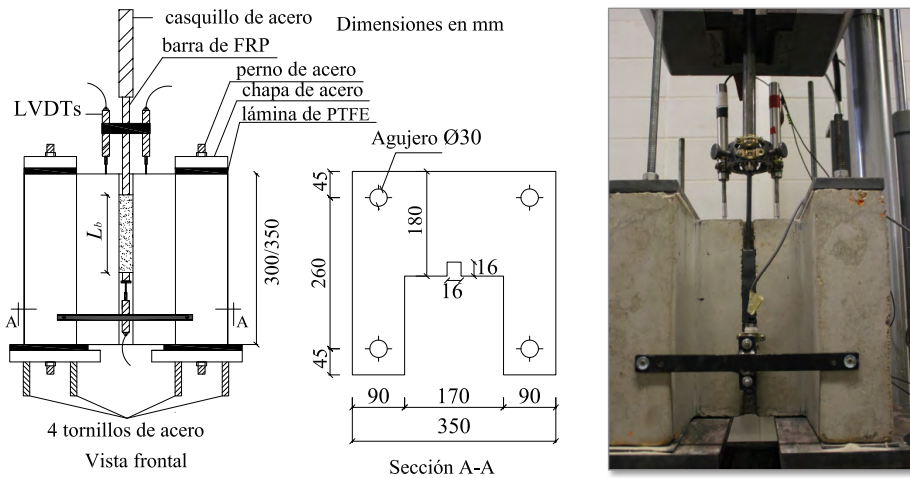


Figura 7.1: Probetas y configuración del ensayo. Características de las probetas (izquierda) y configuración del ensayo (derecha).

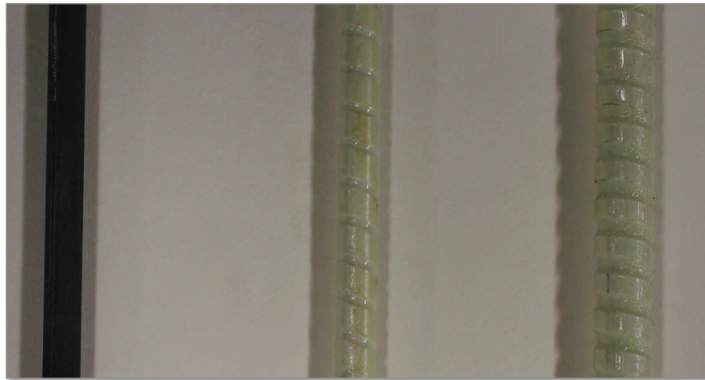


Figura 7.2: Acabado superficial de las barras de FRP. De izquierda a derecha: C1, G1 y G2.

7.4. Resultados y discusión

Los resultados experimentales obtenidos para los especímenes con barras de fibra de carbono (*CFRP*) y fibra de vidrio (*GFRP*) se muestran en las Tablas 7.2 y 7.3, respectivamente. En dichas tablas se indica el tipo de resina empleada, las cargas máximas hasta el fallo por adherencia (F_{max}), el valor medio de la carga para especímenes análogos ($F_{max,av}$), la tensión de tracción máxima en la barra de material compuesto ($f_{f,max} = F_{max,av}/A_f$, siendo A_f el área de la barra), el factor de eficiencia ($\eta = f_{f,max}/f_{fu}$) que relaciona la tensión alcanzada por la

Espécimen	Epoxi	$n (L_b/d_b)$	F_{max} (kN)	$F_{max,av}$ (kN)	$f_{f,max}$ (MPa)	η (%)	$\tau_{max,av}$ (MPa)	S_{fe} (mm)	Fallo
M16AC1-a	A	12	26,89	–	–	–	–	0,097	B-E
M16AC1-b	A	12	27,77	27,33	543,8	23,1	11,32	0,028	B-E
L16AC1-a	A	24	40,12	–	–	–	–	–	LC, B-E
L16AC1-b	A	24	39,97	40,00	795,9	33,9	8,28	0,057	LC, B-E
T16AC1-a	A	30	48,00	–	–	–	–	0,044	LC, B-E
T16AC1-b	A	30	48,70	48,35	962	41,0	6,41	0,030	LC, B-E
M16BC1-a	B	12	39,32	–	–	–	–	0,127	CC, B-E
M16BC1-b	B	12	39,54	39,43	784,5	33,4	13,07	0,243	CC, B-E
L16BC1-a	B	24	48,99	–	–	–	–	0,078	B-E
L16BC1-b	B	24	47,31	48,15	958	40,8	9,98	0,195	B-E
T16BC1-a	B	30	54,79	–	–	–	–	0,088	B-E
T16BC1-b	B	30	58,09	56,44	1123	47,8	9,36	0,075	B-E
M16DC1-a	D	12	30,12	–	–	–	–	0,109	B-E
M16DC1-b	D	12	27,92	29,52	587,4	25,0	12,23	0,035	B-E
L16DC1-a	D	24	49,92	–	–	–	–	0,003	B-E
L16DC1-b	D	24	44,43	–	–	–	–	0,118	B-E
L16DC1-c	D	24	44,37	46,40	920	39,2	9,58	0,085	CC, B-E
T16DC1-a	D	30	53,77	–	–	–	–	0,001	CC
T16DC1-b	D	30	61,67	57,52	1144	48,7	9,53	0,231	CC

B-E = fallo en la interfase barra-epoxy
 CC = fisuración del hormigón
 LC = fisuración longitudinal de la resina epoxy

Tabla 7.2: Resultados experimentales para los especímenes con barras de *CFRP*.

barra en el ensayo con su resistencia a tracción, el valor medio de la tensión máxima de adherencia en la interfase entre barra y adhesivo ($\tau_{max,av}$ para $F = F_{max,av}$) y el deslizamiento del extremo libre (S_{fe}) para la carga máxima. Asimismo se presentan en este apartado las curvas de tensión media de adherencia-deslizamiento para los distintos especímenes ensayados. Los valores de la tensión media de adherencia a lo largo de la barra (τ_{av}) y del deslizamiento en el extremo cargado (S_{le}) se obtienen de acuerdo con:

$$\tau_{av} = \frac{F}{\pi d_b L_b} \tag{7.1}$$

$$S_{le} = S_t - \frac{FL}{E_f A_f} \tag{7.2}$$

donde F es la fuerza aplicada en el ensayo, d_b es el diámetro de la barra, L_b es la longitud de adherencia, S_t es el deslizamiento medio medido por los transductores en el extremo cargado, L es la longitud entre el extremo superior de la longitud adherida y la posición de los transductores, E_f es el módulo de elasticidad de la barra y A_f es el área de la barra.

7.4.1. Barras *NSM CFRP*

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a las barras de *CFRP* analizando los valores de carga máxima, modo de fallo y tensión media de adherencia. Tal como se muestra en la Tabla 7.2, la carga máxima aumenta con el aumento de la longitud de adherencia independientemente del tipo de adhesivo empleado. Asimismo se puede observar que

la carga aumenta cuando se cambia el tipo de resina epoxi de A a B y de A a D, aunque con distinto porcentaje.

El modo de fallo predominante para los especímenes *NSM CFRP* tuvo lugar en la interfase barra-epoxi (véase Figura 7.3 izquierda), excepto para los especímenes T16DC1-a y T16DC1-b que fallaron por fisuración del hormigón (Figura 7.3 derecha). En los especímenes con epoxi tipo A se formaron fisuras longitudinales en el adhesivo (Figura 7.3 izquierda), mientras que en las probetas con epoxi tipo D aparecieron fisuras de tracción en la superficie del hormigón (T16DC1-a y T16DC1-b, Figura 7.3 derecha).

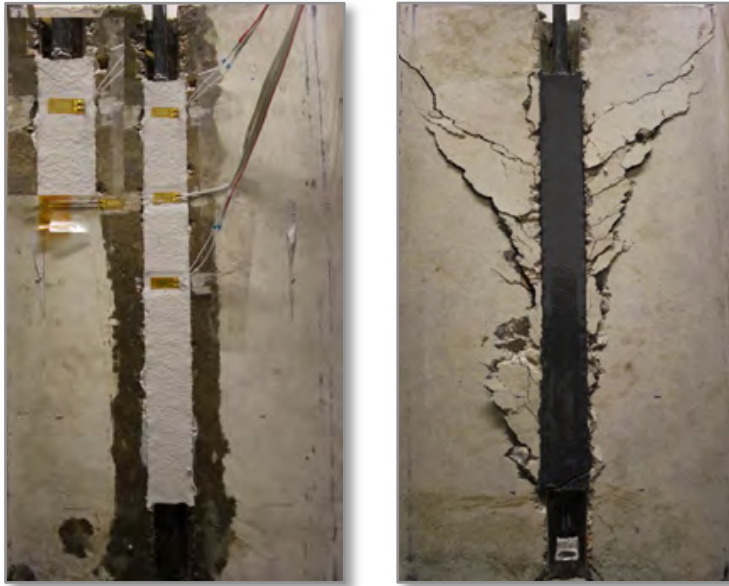


Figura 7.3: Modo de fallo especímenes con barras de *CFRP*. T16AC1-a (izquierda) y T16DC1-b (derecha).

En los especímenes con barras de *CFRP* y epoxi tipo A se observa un incremento de la carga media ($F_{max,av}$) del 46,4% cuando se aumenta la longitud de adherencia (L_b) de $12d_b$ a $24d_b$; mientras que incrementando L_b de $12d_b$ a $30d_b$, $F_{max,av}$ aumenta en un 76,91%. Asimismo un incremento del 25% de L_b (de $24d_b$ a $30d_b$) produce un aumento del 20,9% en $F_{max,av}$. En los especímenes en los que se empleó resina epoxi tipo B, el aumento de L_b de $12d_b$ a $24d_b$ produce un incremento en $F_{max,av}$ del 22,1%; mientras que un aumento de $12d_b$ a $30d_b$ incrementa $F_{max,av}$ en un 43,1%. En este caso, un incremento en la longitud de adherencia del 25% produce un aumento del 21,0% en $F_{max,av}$. El cambio de la resina A por B produce un aumento de $F_{max,av}$ del 44,0%, 20,4% y 16,7% para las longitudes de adherencia del $12d_b$, $24d_b$ y $30d_b$, respectivamente.

Con objeto de poder evaluar mejor el efecto del tipo de adhesivo en la capacidad de carga de la unión, se ensayaron asimismo probetas con la resina tipo D. Los resultados para estos especímenes indican que el aumento de L_b de $12d_b$ a $24d_b$ produce un incremento del 56,6% en $F_{max,av}$; mientras que al pasar L_b de $12d_b$ a $30d_b$ incrementa $F_{max,av}$ en un 94,8%. Por el

contrario, cambiando la resina de tipo B a tipo D produce una disminución en $F_{max,av}$ del 9,9% y del 4,0% para las longitudes de adherencia de $12d_b$ y $24d_b$; mientras que $F_{max,av}$ aumenta en un 1,9% para los especímenes con longitud de adherencia de $30d_b$.

Estos resultados muestran claramente que la longitud de adherencia influye en el efecto del tipo de resina en la carga máxima, o viceversa, siendo la diferencia de propiedades entre las resinas D y A de 1193 MPa (+19,8%), 14,6 MPa (+20,8%) y 2,1 MPa (+11,1%) para el módulo de elasticidad, la resistencia a compresión y la resistencia a tracción, respectivamente. Las probetas con epoxi D presentan mayores cargas (con el mismo modo de fallo) que las preparadas con epoxi A, con incrementos del 8,0%, 15,6% y 20,0% para las longitudes de $12d_b$, $24d_b$ y $30d_b$, respectivamente. Aunque la diferencia de propiedades entre las resinas tipo B y D es de 1100 MPa (+13,8%), 10,7 MPa (+10,7%) y 2,0 MPa (+8,7%) para el módulo de elasticidad, la resistencia a compresión y la resistencia a tracción (con valores absolutos similares a las diferencias entre las resinas D y A), el cambio de B a D produce un ligero incremento en la carga máxima para la longitud de $30d_b$; mientras que para las otras longitudes ($12d_b$ y $24d_b$) la carga experimenta una ligera reducción. Esto parecería indicar que la modificación en la resina produce una mejora en el comportamiento adherente de este tipo de barra de *FRP* aumentado la cohesión y fricción entre barras y epoxi, y disminuyendo el deslizamiento para las longitudes de adherencia más largas.

En las Figuras 7.4, 7.5 y 7.6 se compara el efecto de L_b y del tipo de adhesivo en la tensión media de adherencia (τ_{av}) calculada con la ecuación 7.1. La Figura 7.4, muestra las curvas de tensión de adherencia-deslizamiento ($\tau - s$) para los especímenes con epoxi tipo A. Se puede observar que al aumentar la longitud de adherencia, la tensión media de adherencia disminuye a causa de la distribución no uniforme de las tensiones a lo largo de las barras de $12d_b$ y $24d_b$; mientras que no se observa influencia en la tensión media cuando L_b varía de $24d_b$ a $30d_b$ debido al cambio de modo de fallo y pasar de la interfase barra-epoxi a la fisuración del hormigón. Este mismo comportamiento también se observa en el caso de especímenes con epoxi tipo B y D, los cuales presentaron mayor tensión media de adherencia que los de epoxi A para todas las longitudes de adherencia (véanse Figuras 7.5 y 7.6).

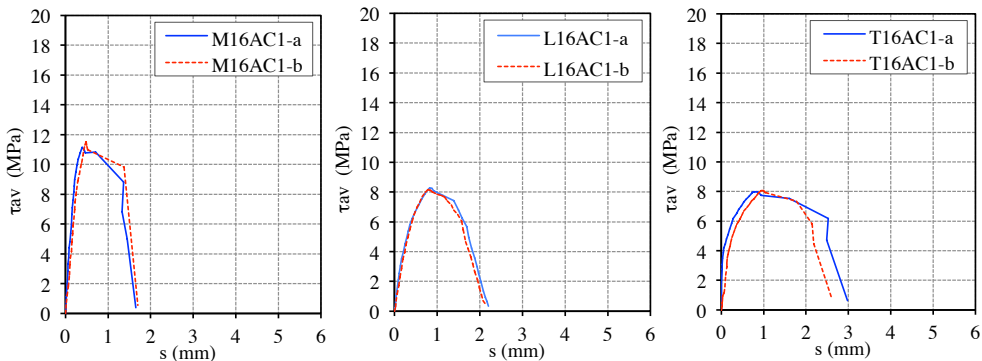


Figura 7.4: Curvas de tensión media de adherencia-deslizamiento para especímenes con barras de *CFRP* con epoxy tipo A. De izquierda a derecha: (a) $L_b = 12d_b$, (b) $L_b = 24d_b$ y (c) $L_b = 30d_b$.

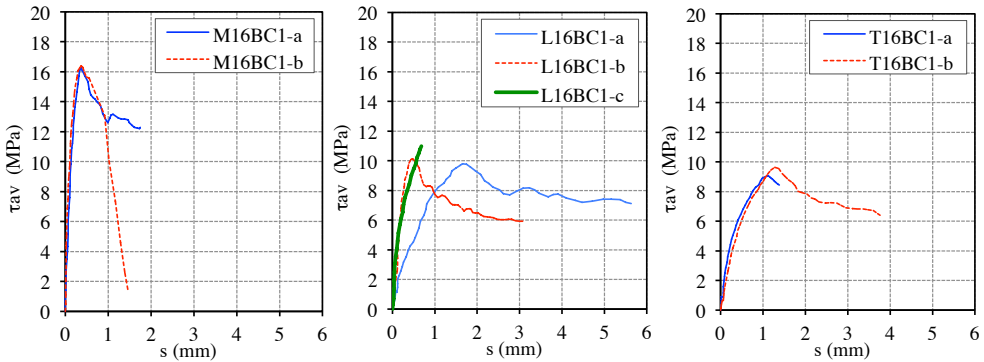


Figura 7.5: Curvas de tensión media de adherencia-deslizamiento para especímenes con barras de *CFRP* con epoxy tipo B. De izquierda a derecha: (a) $L_b = 12d_b$, (b) $L_b = 24d_b$ y (c) $L_b = 30d_b$.

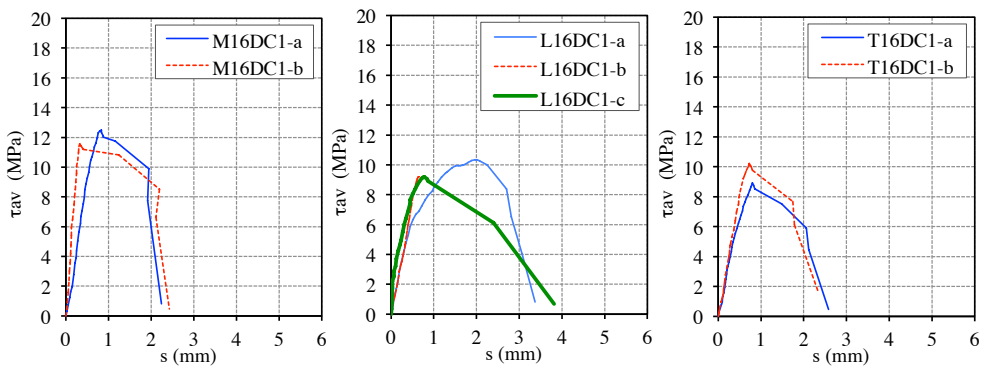


Figura 7.6: Curvas de tensión media de adherencia-deslizamiento para especímenes con barras de *CFRP* con epoxy tipo D. De izquierda a derecha: (a) $L_b = 12d_b$, (b) $L_b = 24d_b$ y (c) $L_b = 30d_b$.

7.4.2. Barras *NSM GFRP*

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a las barras de *GFRP* analizando asimismo los valores de carga máxima, modo de fallo y tensión media de adherencia. Los resultados de la Tabla 7.3 muestran que la carga máxima aumenta al incrementar la longitud de adherencia para todos los tipos de adhesivo y también al pasar de resina tipo A a B o de tipo A a D.

El modo de fallo de los especímenes con barras *GFRP* varía según el adhesivo utilizado. En los especímenes con epoxy A aparecieron fisuras longitudinales en la superficie del adhesivo al inicio del proceso de carga que se fueron propagando hasta el fallo, con fisuración final del hormigón o incluso rotura dependiendo de la longitud de adherencia (véase Figura 7.7 (a)). Para los especímenes con epoxy B y D, el fallo tuvo lugar bien en la interfase barra-epoxy, o bien como consecuencia de daño en el acabado exterior de la propia barra, asimismo en función de la longitud de adherencia (Figuras 7.7 (b) y (c)).

7 | Estudio de la adherencia de barras *NSM FRP* como refuerzo de estructuras de hormigón

Espécimen	Epoxi	$n (L_b/d_b)$	F_{max} (kN)	$F_{max,av}$ (kN)	$f_{f,max}$ (MPa)	η (%)	$\tau_{max,av}$ (MPa)	S_{fe} (mm)	Fallo
M16AG1-a	A	12	28,32	–	–	–	–	0,002	LC, CC
M16AG1-b	A	12	27,86	28,09	558,9	41,4	11,64	0,685	LC, CC
L16AG1-a	A	24	36,23	–	–	–	–	0,094	LC, CC, ES
L16AG1-b	A	24	38,92	37,57	747,5	55,4	7,78	–	LC, CC, ES
S16BG1-a	B	6	18,99	–	–	–	–	0,265	CC, B-E
S16BG1-b	B	6	19,51	19,25	383	28,3	15,95	0,751	CC, B-E
M16BG1-a	B	12	35,31	–	–	–	–	0,327	CC, B-E
M16BG1-b	B	12	32,93	34,12	678,9	50,3	14,14	0,125	CC, CS
L16BG1-a	B	24	56,67	–	–	–	–	0,258	CC, BD
L16BG1-b	B	24	44,57	–	–	–	–	0,233	CC, BD
L16BG1-c	B	24	48,06	49,76	990,1	73,3	10,31	0,371	CC, BD
T16BG1-a	B	30	60,87	–	–	–	–	0,073	CC, CS
T16BG1-b	B	30	60,15	60,51	1203,9	89,2	10,03	0,019	CC, CS
S16DG1-a	D	6	19,83	–	–	–	–	0,815	CC, B-E
S16DG1-b	D	6	22,39	21,11	420	31,1	17,5	0,246	CC, B-E
M16DG1-a	D	12	33,60	–	–	–	–	0,665	CC, CS
M16DG1-b	D	12	33,14	33,37	663,9	49,2	13,83	0,664	CC, B-E
L16DG1-a	D	24	52,10	–	–	–	–	0,298	CC, BD
L16DG1-b	D	24	57,79	54,95	1093,3	81,0	11,38	0,290	BD
L18AG2-a	A	24	59,97	–	–	–	–	0,057	LC, CS
L18AG2-a	A	24	57,53	58,75	519,9	38,5	8,11	0,072	LC, CC

CC = fisuración del hormigón

LC = fisuración longitudinal de la resina epoxy

B-E = fallo en la interfase barra-epoxy

CS = rotura por tracción transversal de la probeta de hormigón y daño en la barra

Tabla 7.3: Resultados experimentales para los especímenes con barras de *GFRP*.



Figura 7.7: Modo de fallo especímenes con barras de *GFRP*.

De izquierda a derecha: (a) M16AG1-b, (b) L16BG1-b y (c) T16BG1-b.

En los especímenes con barras de *GFRP* y epoxi tipo A el aumento de la longitud de adherencia L_b de $12d_b$ a $24d_b$ produce un incremento de $F_{max,av}$ del 33,8%. El aumento de L_b de $6d_b$ a $12d_b$ y de $6d_b$ a $24d_b$ incrementa $F_{max,av}$ en un 77,3% y un 158,5% respectivamente; mientras que cuando se aumenta de $12d_b$ a $24d_b$ y de $12d_b$ a $30d_b$ incrementa $F_{max,av}$ en un

45,6% y un 77,3%, respectivamente. Para los especímenes con epoxi D el incremento de L_b de $6d_b$ a $12d_b$ y de $6d_b$ a $24d_b$, aumentó $F_{max,av}$ en un 58,1% y un 160,3%, respectivamente; mientras que pasando de $12d_b$ a $24d_b$, $F_{max,av}$ aumentó en un 64,7%. Estos resultados muestran claramente que el aumento de la longitud de adherencia produce incremento de carga cualquiera que sea la resina utilizada, y que el porcentaje de este incremento es mayor en el caso de las resinas tipo B y D.

El cambio de adhesivo del tipo A al B produce incrementos de $F_{max,av}$ del 21,5% y del 32,5% para las longitudes $12d_b$ y $24d_b$, respectivamente. Asimismo, cambiando el adhesivo del tipo A al tipo D, el aumento en $F_{max,av}$ es del 18,8% y del 46,3% para las longitudes de $12d_b$ y $24d_b$, respectivamente. El empleo de la resina tipo D produjo incrementos porcentuales de la carga menores que los obtenidos con la resina tipo B. Tal como se indicó, aun cuando la diferencia de propiedades entre las resinas D y A es aproximadamente igual que entre las resinas B y D, en las probetas con epoxi D se obtuvieron mayores capacidades de carga que en las que se usó la tipo A, presentando distinto modo de fallo. Las diferentes propiedades entre las resinas pueden haber afectado a la cohesión y la fricción entre barra y epoxi. Parecería que para las resinas B y D, el deslizamiento entre la superficie ranurada de la barra de *GFRP* junto con la mayor deformabilidad de la resina, permitieron una mejor redistribución de las tensiones a lo largo de la longitud de adherencia, sin apreciarse daño en la barra en el caso de la resina D.

Por lo que respecta al efecto de la longitud de adherencia L_b sobre la tensión media τ_{av} , en la Figura 7.8 se muestran los resultados para los especímenes con epoxi tipo A, apreciándose una disminución de τ_{av} con el aumento de longitud como consecuencia de la distribución no uniforme de las tensiones de adherencia, en concordancia con lo observado en [5, 9, 11, 13, 16]. En los especímenes con barras *GFRP* y epoxi tipo B y D se registraron mayores valores de τ_{av} y de deslizamiento que con los correspondientes especímenes con epoxi A (véanse Figuras 7.8, 7.9 y 7.10). Esto puede haberse debido al daño en el acabado ranurado de la superficie, causando un incremento de deslizamiento. Los especímenes con barras *GFRP* con menor módulo elástico E_f , presentaron mayores deslizamientos que los correspondientes a barras *CFRP* con el mismo tipo de adhesivo. Por otra parte, la tensión media de adherencia y el deslizamiento disminuyeron en los especímenes con barras tipo G2 (Figura 7.8 (c)) con más rigidez que las G1 por su mayor diámetro.

7.4.3. Comparación de resultados

Los resultados del presente estudio muestran la influencia del tipo de adhesivo en el comportamiento adherente y carga máxima de la técnica de refuerzo *NSM FRP*, lo cual concuerda con resultados de otros estudios [9, 15]. La Figura 7.11 muestra el efecto del tipo de epoxi en la tensión media $\tau_{max,av}$ y en la eficiencia del refuerzo ($F_{max,av}/F_u$, siendo F_u la carga de rotura del *FRP*.), para especímenes con barras *CFRP* con tres longitudes diferentes de adherencia: $12d_b$, $24d_b$ y $30d_b$. La Figura 7.11 (a) muestra como $\tau_{max,av}$ aumenta con el incremento de la tensión de rotura y el módulo de elasticidad del adhesivo. Por el contrario, $\tau_{max,av}$ disminuye con el aumento de la longitud de adherencia, cualquiera que sea el tipo de epoxi. La disminución porcentual de $\tau_{max,av}$ es irrelevante cuando L_b aumenta de $24d_b$ a $30d_b$.

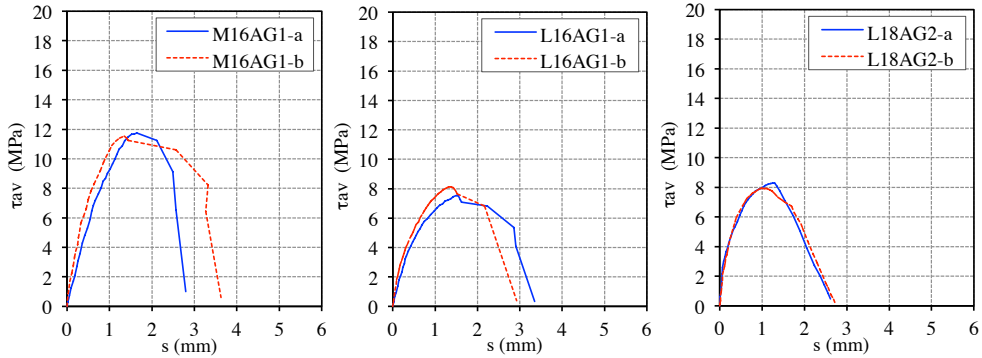


Figura 7.8: Curvas de tensión media de adherencia-deslizamiento para especímenes con barras de *GFRP* con epoxy tipo A. De izquierda a derecha: (a) $L_b = 12d_b$, (b) $L_b = 24d_b$ y (c) $L_b = 24d_b$.

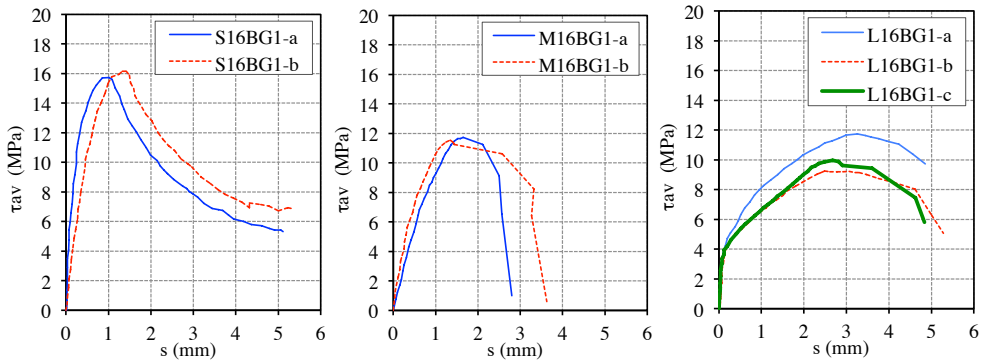


Figura 7.9: Curvas de tensión media de adherencia-deslizamiento para especímenes con barras de *GFRP* con epoxy tipo B. De izquierda a derecha: (a) $L_b = 6d_b$, (b) $L_b = 12d_b$ y (c) $L_b = 24d_b$.

Por otra parte, la eficiencia de la unión aumenta con el incremento de propiedades de la resina (véase Figura 7.11 (b)), así como con el aumento de L_b para todos los tipos de adhesivo. Los especímenes con barras *GFRP* y epoxy D (Figura 7.12) presentan mayores tensiones de adherencia y valores de eficiencia, que los correspondientes elementos con epoxy A y B. Igualmente, los valores de eficiencia son mayores que los de los correspondientes especímenes con barras *CFRP*, tal como puede verse en las Figuras 7.11 (b) y 7.12 (b).

7.5. Conclusiones

En este capítulo se ha presentado un estudio experimental de la adherencia del sistema *NSM FRP* para el refuerzo de estructuras de hormigón mediante el ensayo de *pull-out* modificado, en el que se ha considerado el efecto del tipo de adhesivo, el tipo de *FRP*, el tamaño de la barra y la longitud de adherencia. Se han utilizado tres tipos de adhesivo epoxy: tipo A (MBRACE ADHESIVE HT), tipo B (POLYFIXER EP) y tipo D (obtenido mediante la modificación del tipo B). Se han ensayado tres tipos de barras: C1 (*CFRP* de 8 mm de diámetro),

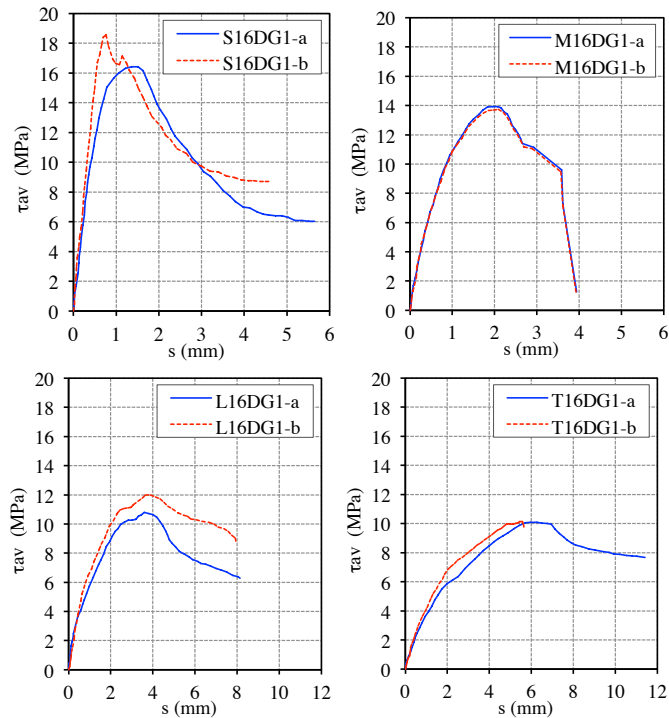


Figura 7.10: Curvas de tensión media de adherencia-deslizamiento para especímenes con barras de *GFRP* con epoxy tipo D. De izquierda a derecha y de arriba abajo: (a) $L_b = 6d_b$, (b) $L_b = 12d_b$, (c) $L_b = 24d_b$ y (d) $L_b = 30d_b$.

G1 (*GFRP* de 8 mm de diámetro) y G2 (*GFRP* de 12 mm de diámetro). Para las barras de *CFRP* se ensayaron longitudes de adherencia de $12d_b$, $24d_b$ y $30d_b$; mientras que para las de *GFRP* se usaron $6d_b$, $12d_b$, $24d_b$ y $30d_b$. A partir de los resultados se obtienen las siguientes conclusiones:

- El tipo de adhesivo ha tenido una gran influencia sobre la adherencia de las barras en el hormigón. Este efecto varía según la longitud de adherencia y el tipo de barra.
- El modo de fallo predominante para las barras de *CFRP* ha sido el fallo en la interfase barra-resina, excepto en dos especímenes que fallaron por fisuración del hormigón (T16DC-a, T16DC-b). Por otra parte, el modo de fallo predominante de los especímenes con barras de *GFRP* ha variado según el tipo de resina: fisuración o rotura del hormigón para el adhesivo tipo A, y fallo en la interfase barra-epoxi o daño en el acabado exterior de la barra para los adhesivos tipo B y D.
- Para los especímenes con barras de *CFRP*, el cambio del tipo de adhesivo de A a B ha supuesto un aumento de la capacidad de carga del 44,3%, 20,4% y 16,7% para las longitudes de adherencia de $12d_b$, $24d_b$ y $30d_b$, respectivamente. Por otra parte, el cambio del tipo de adhesivo de A a D ha supuesto un incremento de la carga del 8,0%, 15,6% y 20,0% para longitudes de adherencia de $12d_b$, $24d_b$ y $30d_b$, respectivamente. A pesar de que la diferencia de propiedades entre los adhesivos B y D era similar a la de los adhesivos A y D, el cambio de tipo B a tipo D ha dado lugar solamente a un

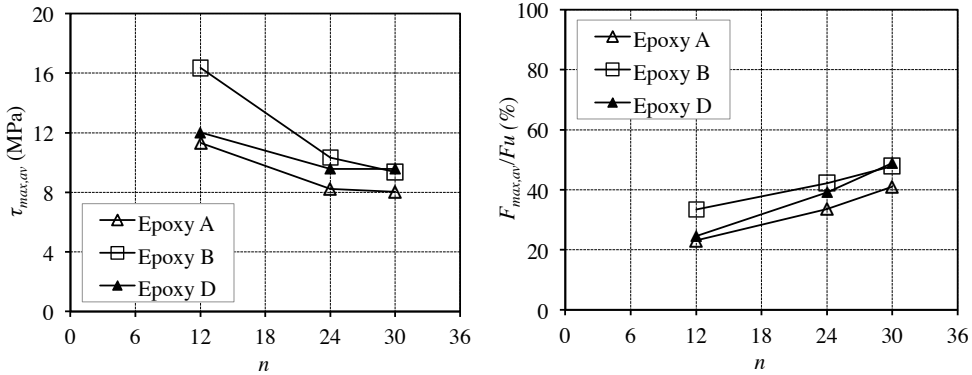


Figura 7.11: Efecto del tipo de resina epoxy y longitud de adherencia para los especímenes con barras *CFRP* en (de izquierda a derecha): (a) $\tau_{max,av}$ y (b) $\%F_{max,av}/F_u$; ($n = L_b/d_b$).

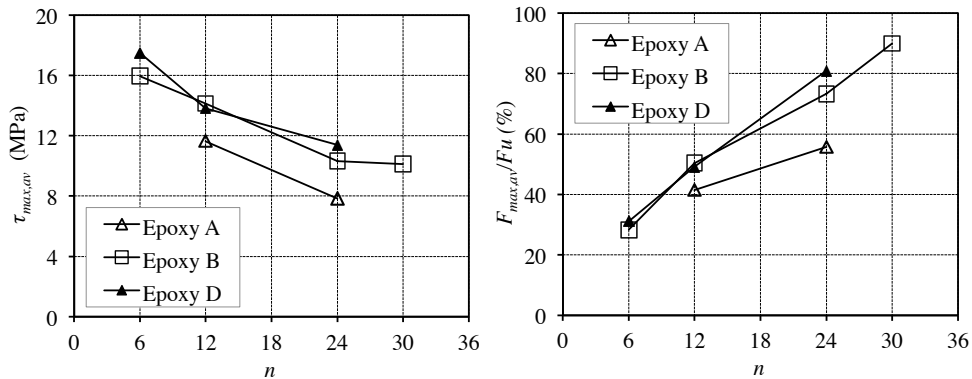


Figura 7.12: Efecto del tipo de resina epoxy y longitud de adherencia para los especímenes con barras *GFRP* en (de izquierda a derecha): (a) $\tau_{max,av}$ y (b) $\%F_{max,av}/F_u$; ($n = L_b/d_b$).

ligero aumento de la carga máxima de las barras de $30d_b$ de longitud de adherencia, y a una disminución en las otras longitudes ($12d_b$ y $24d_b$). Este cambio en el tipo adhesivo altera el comportamiento adherente con la barra *FRP*, con un aumento de la cohesión y de la fricción entre la barra y epoxi y una disminución del deslizamiento a mayores longitudes de adherencia.

- Para los especímenes con barras de *GFRP*, el cambio de adhesivo de A a B ha incrementado la carga máxima en un 21,5% y 32,5% para las longitudes de $12d_b$ y $24d_b$, respectivamente; mientras que el cambio de A a D ha supuesto un aumento de carga del 18,8% y el 46,3% para las longitudes de adherencia de $12d_b$ y $24d_b$. Aun siendo la diferencia de propiedades entre epoxi A y D similar a la de B y D, los especímenes con resina D mostraron una carga mayor que las unidas con resina del tipo A, aunque con distinto modo de fallo. La superficie ranurada de las barras de *GFRP* empleadas ha causado un modo de fallo distinto, y con la mayor flexibilidad de la resina se ha producido una mejora en la redistribución de las tensiones de adherencia a lo largo de la longitud.

- La longitud de adherencia ha tenido una gran influencia en el comportamiento de la unión. Incrementando la longitud se han obtenido mayores cargas y menores tensiones medias para cualquiera de los adhesivos empleados. La eficiencia del refuerzo incrementa asimismo con el aumento de longitud de adherencia.
- El aumento del diámetro de la barra ha incrementado la carga de rotura, aunque disminuyendo la eficiencia del refuerzo. Con la misma rigidez axial, la capacidad de carga de las barras se ha visto influenciada por el tipo de adhesivo y la longitud de adherencia.

Todo ello pone de manifiesto la interrelación entre las variables estudiadas y el comportamiento adherente del refuerzo *NSM FRP*. Como se demuestra, el modo de fallo, las superficies en contacto y las propiedades mecánicas de los materiales tienen un papel determinante en la respuesta de la unión.

7.6. Líneas futuras

Como continuación del estudio experimental llevado a cabo se propone el desarrollo de modelos analíticos y numéricos que puedan ser calibrados con los resultados obtenidos en éste y otros trabajos, que permitan profundizar en el estudio de los estados tenso-deformacionales de los materiales involucrados. Debe estudiarse la influencia de diversas variables como son el tipo y propiedades del *FRP*, su acabado superficial, el perímetro y área del refuerzo, las propiedades del adhesivo y las propiedades del hormigón, tanto en el comportamiento global del elemento como en el comportamiento a nivel local. La aplicación de los modelos mediante un estudio paramétrico debería conducir a la obtención de ecuaciones aptas para el diseño.

Asimismo es de interés un estudio comparativo entre los distintos métodos experimentales de ensayo del comportamiento adherente. Combinando distintas variables debería verse si las diferentes configuraciones de ensayo proporcionan resultados en el mismo sentido y cuáles son sus valores relativos.

Finalmente el estudio debe ser extendido a elementos a flexión tanto en su vertiente experimental como numérica.

Agradecimientos Los autores agradecen la financiación obtenida del Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto BIA2012-20234-C03-02. El primer autor agradece la ayuda obtenida mediante una beca predoctoral FI de la Generalitat de Catalunya, Ref. 2011-B00003.

Bibliografía seleccionada

De entre la abundante bibliografía sobre el comportamiento del refuerzo de estructuras de hormigón armado a base de *NSM FRP*, se pueden destacar los siguientes artículos:

- DE LORENZIS, L. AND TENG, J.G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering*, 38(2) (2007), 119-143.

- DE LORENZIS, L. AND NANNI, A. Characterization of FRP Rods as Near Surface Mounted Reinforcement. *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 5(2) (2001), 114-121.
- HASSAN, T., AND RIZKALLA, S. Investigation of Bond in Concrete Structures Strengthened with Near Surface Mounted CFRP Strips. *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 7(3) (2003), 248-257.
- TÄLJSTEN, B., CAROLIN, A. AND NORDIN, H. Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP. *Advances in Structural Engineering*, 6(3) (2003), 201-221.

La técnica *NSM FRP* puede encontrarse referenciada en la siguiente guía de diseño:

- ACI Committee 440. *ACI 440.2R-08. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2008.

Asimismo puede encontrarse información sobre los productos y su utilización en manuales y otra información técnica editada por los propios fabricantes, como por ejemplo:

- www.mbrace.es/refuerzo-estructuras
- <http://aslanfrp.com/index.html>
- www.sika.com

Finalmente se recomienda la lectura de las siguientes tesis doctorales que tratan sobre el refuerzo del hormigón con la técnica *NSM FRP* y su comportamiento adherente:

- DE LORENZIS, L. *Strengthening of RC structures with near surface mounted FRP rods*. Ph.D. Thesis, University of Lecce (Italy) (2002).
- CHOI, H. T. *Flexural Behaviour of Partially Bonded CFRP Strengthened Concrete T-Beams*. Ph.D. Thesis, The University of Waterloo, Ontario (Canada) (2008).
- SENA-CRUZ, J.M. *Strengthening of concrete structures with near-surface mounted CFRP laminate strips*. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Minho (Portugal) (2004).

Referencias

- [1] ACI 440.3R-04. *Guide test methods for fiber-reinforced polymers (FRPs) for reinforcing or strengthening concrete structures*. American Concrete Institute, 2004.
- [2] ALKHRDAJI, T., NANNI, A., CHEN, G., AND BARKER, M. Upgrading the transportation infrastructure: solid RC decks strengthened with FRP. *Concrete International, American Concrete Institute* 21, 10 (1999), 37-41.
- [3] BILOTTA, A., CERONI, F., DI LUDOVICO, M., NIGRO, E., PECCE, M., AND MANFREDI, G. Bond Efficiency of EBR and NSM FRP Systems for Strengthening Concrete Members. *Journal of composite for construction* 15, 7 (2011), 757-772.
- [4] CAPOZUCCA, R. Overview of testing to failure program of a highway bridge strengthened with

- frp composites. In *International Symposium on FRP for Reinforcement of Concrete Structures (FRPRCS4)*, Baltimore (1999), pp. 69–80.
- [5] DE LORENZIS, L., RIZZO, A., AND LA TEGOLA, A. A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete. *Composites Part B: Engineering* 33, 8 (2002), 589–603.
- [6] DE LORENZIS, L., AND TENG, J. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures. *Composites Part B: Engineering* 38, 2 (2007), 119–143.
- [7] EMMONS, P., THOMAS, J., AND SABNIS, G. New strengthening technology for blue circle cement silo repair and upgrade. In *Proceedings of FRP Workshop US-AID, Cairo, Egypt* (2001).
- [8] FIB BULLETIN 10. Bond of reinforcement in concrete. State-of-the-art report, Tech. Rep., 2000.
- [9] GALATI, D., AND DE LORENZIS, L. Effect of construction details on the bond performance of NSM FRP bars in concrete. *Advances in Structural Engineering* 12 (2009), 683–700.
- [10] ISO 527-1. Plastics - Determination of tensile properties. Part 1: General principles, 2012.
- [11] NOVIDIS, D., PANTAZOPOULOU, S., AND TENTOLOURIS, E. Experimental study of bond of NSM-FRP reinforcement. *Construction and Building Materials* 21, 8 (2007), 1760–1770.
- [12] PARRETTI, R., AND NANNI, A. Strengthening of RC members using near-surface mounted FRP composites: Design overview. *Advances in Structural Engineering* 7, 6 (2004), 469–483.
- [13] SENA CRUZ, J. *et. al.* Bond behavior between glulam and GFRP's by pullout tests. *Composites Part B: Engineering* 43, 3 (2012), 1045–1055.
- [14] SERACINO, R., JONES, N., MOHAMED ALI, M., PAGE, M., AND OEHLERS, D. Bond strength of near-surface mounted CFRP strip-to-concrete joints. *Journal of Composites for Construction* 11, 4 (2007), 401–409.
- [15] SHARAKY, I. A., TORRES, L., BAENA, M., AND MIÁS, C. An experimental study of different factors affecting the bond of NSM FRP bars in concrete. *Composite Structures* 99, 1 (2012), 350–365.
- [16] SHARAKY, I. A., TORRES, L., BAENA, M., AND VILANOVA, I. Effect of different material and construction details on the bond behaviour of NSM FRP bars in concrete. *Construction and Building Materials* 38, 1 (2012), 890–902.
- [17] SOLIMAN, S., EL-SALAKAWY, E. AND BENMOKRANE, B. Bond Performance of Near-Surface-Mounted FRP Bars. *Journal of Composites for Construction* 15, 1 (2011), 103–111.
- [18] TÄLJSTEN, B., CAROLIN, A., AND NORDIN, H. Concrete beams strengthened with near surface mounted CFRP laminates. In *Proceedings of CFRPCS-5, C.Burgoyne (ed.) Cambridge, UK* (2001), pp. 107–116.
- [19] TÄLJSTEN, B., CAROLIN, A., AND NORDIN, H. Concrete structures strengthened with near surface mounted reinforcement of CFRP. *Advances in Structural Engineering* 6, 3 (2003), 201–221.
- [20] UNE-EN 12390-3. Ensayos de hormigón endurecido - Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas, 2009.
- [21] UNE-EN 12390-6. Ensayos de hormigón endurecido - Parte 6: Resistencia a tracción indirecta de probetas, 2009.
- [22] UNE-EN 13412. Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. Métodos de ensayo. Determinación del módulo de elasticidad en compresión, 2008.
- [23] WARREN, G. Pier Upgrade Advanced Technology Demonstration Site No. 3: Bravo 25, Naval Station Pearl Harbor, Hawaii. Report SSR-2567-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center, Port Hueneme, California, 2000.