DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES

**ESTUDIO TEÓRICO-EXPERIMENTAL DE VIGAS DE HORMIGÓN
ARMADO REFORZADAS EXTERNAMENTE A CORTANTE
MEDIANTE MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ
POLIMÉRICA INSERTADOS EN EL RECUBRIMIENTO**

TESIS DOCTORAL

Daniel Cisneros Quero
Ingeniero Industrial

Directores:

Ana de Diego Villalón
Dra. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

Ricardo Perera Velamazán
Dr. Ingeniero de Minas

2017

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día ____ de _____ de 2017.

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la tesis el día ____ de _____ de 2017 en la E.T.S. Ingenieros Industriales.

CALIFICACIÓN:

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Agradecimientos

Quisiera aprovechar estas líneas para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que de una manera u otra han contribuido durante estos últimos años para que este trabajo vea finalmente la luz.

En primer lugar, quisiera agradecer a mis directores de tesis, Ana de Diego y Ricardo Perera, su inestimable ayuda y continuo apoyo durante todos estos años y especialmente en los momentos más difíciles. De igual manera, quisiera agradecer a Ángel Arteaga toda la ayuda, los consejos y oportunidades brindadas desde el primer al último día, sin las cuales no hubiese sido posible la realización de esta tesis.

Agradecer también a mis compañeros del Instituto Eduardo Torroja, en donde se ha fraguado la mayor parte de este trabajo, y de la UPM los buenos momentos compartidos durante estos años y que han ayudado a hacer mucho más ameno todo este periplo. Gracias a Ángel, Ana, Albert, Luis Felipe, Carlos, Miguel, Ramón, Duc, Sonia, Javi y Enrique entre otros.

A todo el personal de la nave de ensayos del Instituto Eduardo Torroja: Rafa, Gabriel, Javier, Roberto, Javi, Carlos, Jesús... Gracias por toda la ayuda prestada durante la realización de las distintas campañas experimentales.

Al Gobierno de España por la financiación de los proyectos de investigación en los que he podido participar y en los que se ha realizado el trabajo experimental presentado en esta tesis. Al Consejo Superior de Investigaciones Científicas y al Fondo Social Europeo por la cofinanciación de la beca JAE-Predoc que he disfrutado. Y también agradecer a BASF el suministro del material empleado y el soporte técnico ofrecido.

A mi familia por toda la ayuda, el apoyo y la paciencia mostrada durante estos últimos años y a lo largo de toda mi vida.

Y finalmente agradecer a Vane, que siempre ha estado junto a mí y que ha sufrido la que más los sinsabores de esta travesía, todo su apoyo y comprensión sin el cual hubiera sido todo mucho más complicado si cabe. Y a la pequeña Emma que aunque aún no es consciente de ello ha ayudado a culminar este trabajo.

Resumen

Por múltiples razones, cada día es más frecuente tener que recurrir al refuerzo de estructuras: errores en el proyecto, ejecución o conservación; necesidad de adaptarse a nuevas cargas por cambio de uso; deterioro del patrimonio histórico o, simplemente, construido; accidentes o fallos locales; corrosión de las partes metálicas; etc.

Existen técnicas de reparación clásicas: empleo de recrecidos de hormigón, empresillados metálicos, pegado de chapas de acero, etc. que han sido ampliamente utilizadas y que han sabido resolver el problema del refuerzo, tanto a flexión, cortadura o compresión en pilares. Sin embargo, estas técnicas presentan algunos problemas comunes que dificultan su utilización: son muy laboriosas, con largos periodos de interrupción del servicio; cambian las dimensiones de la estructura; aumentan el peso u originan nuevos problemas de corrosión.

Por estas razones cada vez es más frecuente recurrir al refuerzo con los nuevos materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras (usualmente denominados FRP por sus siglas en inglés). Estos materiales permiten el refuerzo disminuyendo sensiblemente o eliminando los problemas indicados arriba. Son materiales muy ligeros y de altas resistencias, no sensibles a la corrosión, que no cambian las dimensiones de la pieza reforzada ni aumentan su peso.

Con este material, el FRP, en sus distintas formas, láminas pultrusionadas o laminados conformados in situ a partir de tejidos de fibra, esencialmente, es posible reforzar pilares a compresión mediante el zunchado, o vigas o forjados a flexión o cortante suplementando la armadura de tracción interna existente con tejidos o laminados pegados en la zona de tracción.

El mayor uso hasta ahora ha sido mediante el pegado externo de estos elementos, pero esta técnica tiene algunos problemas: despegue prematuro sin alcanzar tensiones próximas a la rotura, sensibilidad del material a las temperaturas elevadas, debido al uso de resinas epoxi, o al vandalismo. Una nueva técnica, denominada por sus siglas inglesas NSM (Near-Surface Mounted), inserta pequeñas barras o láminas de fibra de carbono, CFRP, en ranuras efectuadas en el recubrimiento de hormigón y rellenadas con resina epoxi u otros materiales, mejorando el comportamiento en los aspectos indicados. En el caso del refuerzo a cortante se realizan las ranuras en el alma de la viga, principalmente verticales o a 45° en la zona que se quiera reforzar.

El estudio y la aplicación de esta técnica va en aumento, pero las aplicaciones prácticas son aún muy limitadas debido a la dificultad de encontrar un método de cálculo unánimemente aceptado para el esfuerzo cortante, incluso en hormigón armado y más, evidentemente, si añadimos un tercer material. Por lo que es necesario un mayor número de estudios que permitan establecer métodos de cálculo fiables.

Aunque el NSM mejore las condiciones de adherencia, la pérdida de ésta sigue siendo la causa principal del fallo de las vigas reforzadas y más en el caso de cortante donde las longitudes de adherencia suelen estar muy limitadas. La adherencia de las láminas o barras de CFRP a la resina y ésta a la superficie del hormigón depende de múltiples factores. Por ello en esta tesis se ha llevado a cabo un programa experimental para caracterizar la adherencia de las barras y láminas que iban a ser utilizadas en el refuerzo a cortante mediante la disposición de ensayo denominado ensayo de la viga. El programa ha contado con un total de 25 vigas, que debido al carácter independiente de cada una de las dos mitades han permitido realizar un total de 50 determinaciones de adherencia usando tres longitudes de adherencia: 48, 96 y 144 mm. Este programa ha permitido caracterizar la fuerza de arrancamiento máxima en la barra/lámina antes del deslizamiento y la tensión máxima de adherencia para esas longitudes ensayadas, con la posible interpolación entre ellas.

El objetivo prioritario de la tesis era determinar la resistencia de vigas de hormigón insuficientemente armadas a cortante y posteriormente reforzadas mediante NSM CFRP para suplir esa condición. Para ello se ha realizado un programa experimental formado por 17 vigas de tamaño real: 3750 mm de longitud y una sección transversal de 200 mm de ancho y 350 mm de altura. Se estudiaron las siguientes variables: barras de 8 mm de diámetro o láminas de 2,5 x 15 mm²; uso de 3 o 6 barras/láminas insertadas dentro de la luz de cortante; y orientación vertical a 90° o a 45°. También se ensayó una viga patrón no reforzada y se consideraron dos vigas idénticamente reforzadas. Además, el armado externo e interno era simétrico y se pudieron ensayar de forma independiente cada uno de los extremos de cada viga, obteniendo, por tanto, cuatro ensayos idénticos para cada tipo de refuerzo (dos para la viga patrón).

Este programa ha permitido, fundamentalmente, establecer que el refuerzo a cortante con NSM CFRP es una técnica sencilla con la que se consiguen incrementos de resistencia importantes, hasta del 80% en nuestro caso. También ha permitido establecer unos límites de uso adecuado del refuerzo (utilizando, claro, los elementos usados en el programa) de forma que el refuerzo con tres barras/láminas a 90° se ve que no aporta incremento sensible de resistencia; mientras que el refuerzo con 6 barras/láminas a 45° no supone un incremento importante de resistencia frente a menores armados por producirse en este caso rotura prematura de la viga por despegue de todo el recubrimiento.

Abstract

The need to resort to the strengthening of structures is becoming ever-increasingly common for many reasons: errors in the design, execution or conservation; the need to adapt to new loads due to the change of use; deterioration of built heritage; accidents or local failures; corrosion of metal parts; etc.

Such classical strengthening techniques as the use of reinforced concrete or metallic grids, or the bonding of steel sheets, have been widely used to solve the problem of strengthening, either for bending, shear or compression in columns. However, these techniques present some common problems that hinder their use, namely: as well as being very laborious, with long periods of service interruption, they may change the structure dimensions or increase weight, or cause new corrosion problems.

These reasons have caused strengthening with the new composites or fibre-reinforced polymers (usually referred to as FRPs) to become increasingly popular as these materials allow strengthening while appreciably decreasing or eliminating the problems indicated above. They are very light materials non-sensitive to corrosion with high resistances which neither change the dimensions of the strengthened element nor increase its weight.

With this material, i.e. FRP, in its various forms, either as pultruded plates or fabrics, essentially, it is possible to reinforce not only compression pillars by bracing, but also bending or shear beams or slabs by supplementing the existing internal tensile reinforcement with fabrics or laminates glued in the traction zone.

The most common use so far has been the external bonding of such elements, but this technique brings some problems, such as premature debonding without reaching tensions close to failure, or its sensitivity to high temperatures, due to the use of epoxy resins, or to vandalism. A new technique called NSM (Near-Surface Mounted), which consists in inserting small bars or strips of CFRP into grooves made in the concrete cover and filled with epoxy resin or other materials, improves its behaviour in the aspects indicated. In the case of shear strengthening, the grooves are made in the concrete cover of the beam, mainly vertically or at 45°, in the area to be strengthened for shear.

The study and application of this technique is increasing, but practical applications are still very limited due to the difficulty of finding a method of calculation unanimously

accepted for shear stress, even in reinforced concrete and also, of course, if a third material is added. Therefore, further research is needed to establish reliable calculation methods.

Although the NSM improves the adhesion conditions, the loss of adhesion is still the main cause of failure of the strengthened beams, and this is even more so in the case of shear where the adhesive lengths are very limited. The adherence of the CFRP strips or bars to the resin and that of the resin to the concrete surface depends on multiple factors. Therefore, in this thesis an experimental programme has been carried out to characterize the adherence of the bars and strips to be used in the shear strengthening by means of the test setup called beam test. The programme has had a total of 25 beams, which due to the independent character of each of the two halves have allowed a total of 50 adherence determinations to be carried out using three adhesion lengths: 48, 96 and 144 mm. This programme has enabled the characterisation of the maximum pull-out force in the bar/strip before the slip and the maximum adherence stress for the lengths tested, with the possible interpolation between them.

The fundamental objective of the thesis was to determine the strength of insufficiently shear reinforced concrete beams which had been subsequently strengthened by means of NSM CFRP to make up for that condition. For this purpose, an experimental programme consisting of 17 real-size beams has been carried out, the beams being 3750 mm in length, with a 200 mm wide and 350 mm high cross section. The following variables were studied: 8 mm diameter bars or strips of $2.5 \times 15 \text{ mm}^2$; use of 3 or 6 bars/strips inserted into the shear span; and vertical orientation at 90° or 45° . A non-strengthened patron beam was also tested. So, there were two identically strengthened beams. In addition, the external and internal reinforcement was symmetrical and each end of each beam was tested independently, obtaining, as a result, four identical tests for each type of strengthening (two for the patron beam).

This programme has made it possible to establish, fundamentally, that shear strengthening with NSM CFRP is a useful technique that achieves important resistance increases, up to 80% in our case. It has also allowed to establish limits of proper use of the strengthening (making use, of course, of the elements used in the programme), revealing that the strengthening with three bars/strips at 90° does not actually contribute to a significant increase in resistance; while the strengthening with 6 bars/strips at 45° does not imply a significant increase in resistance compared to minor strengthening, as in such case premature rupture of the beam occurs due to the splitting of the full concrete cover.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1 Introducción y objetivos	- 1 -
1.1. Introducción	- 1 -
1.2. Alcance y objetivos.....	- 3 -
1.3. Organización del contenido.....	- 4 -
 Capítulo 2 Introducción a los sistemas de refuerzo con materiales compuestos.....	- 7 -
2.1. Introducción	- 7 -
2.2. Aspectos generales de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras (FRP)	- 9 -
2.2.1. Materiales constituyentes de los FRP	- 11 -
2.2.2. Fibras	- 12 -
2.2.2.1. Fibra de vidrio	- 13 -
2.2.2.2. Fibra de carbono	- 15 -
2.2.2.3. Fibra de aramida	- 16 -
2.2.3. Matrices	- 17 -
2.2.3.1. Resina epoxi	- 18 -
2.2.3.2. Resina de poliéster	- 18 -
2.2.3.3. Resina de viniléster.....	- 19 -
2.3. Sistemas de refuerzo con FRP	- 19 -
2.3.1. Refuerzo mediante pegado externo de laminados	- 21 -
2.3.1.1. Laminados prefabricados	- 21 -
2.3.1.2. Laminados de fabricación in situ	- 22 -
2.3.2. Inserción del refuerzo en el recubrimiento (NSM).....	- 23 -
2.3.3. Adhesivos estructurales en el refuerzo con FRP	- 25 -
2.4. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de refuerzo con FRP	- 26 -

Capítulo 3 Refuerzo a cortante de vigas mediante NSM FRP y comportamiento adherente	- 29 -
3.1. Introducción	- 29 -
3.2. Comportamiento adherente del NSM FRP y el hormigón	- 30 -
3.2.1. Mecanismos de fallo en ensayos de adherencia de NSM FRP	- 33 -
3.2.2. Estudios experimentales sobre el comportamiento adherente entre el NSM FRP y el hormigón	- 34 -
3.2.3. Leyes de comportamiento adherente entre NSM FRP y el hormigón	- 41 -
3.3. Refuerzo frente a esfuerzos de cortadura con NSM FRP	- 44 -
3.3.1. Resistencia a cortante de vigas de hormigón armado	- 45 -
3.3.1.1. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)	- 47 -
3.3.1.2. Eurocódigo 2	- 50 -
3.3.1.3. ACI 318	- 51 -
3.3.2. Estudios experimentales sobre el refuerzo a cortante con NSM FRP	- 51 -
3.3.3. Modelos de evaluación de la resistencia a cortante de vigas reforzadas a cortadura mediante NSM FRP	- 55 -
3.3.3.1. De Lorenzis y Nanni (2001)	- 56 -
3.3.3.2. Rizzo y De Lorenzis (2009)	- 59 -
3.3.3.3. Bianco et al. (2007)	- 61 -
3.3.3.4. Bianco et al. (2014)	- 62 -
3.3.3.5. Baghi y Barros (2017)	- 64 -
Capítulo 4 Estudio experimental del comportamiento adherente del NSM FRP	- 67 -
4.1. Introducción	- 67 -
4.2. Programa experimental	- 69 -
4.3. Descripción y fabricación de las vigas	- 70 -
4.4. Materiales de refuerzo	- 72 -
4.5. Preparación e instalación del NSM FRP	- 74 -
4.6. Procedimiento de ensayo	- 77 -
4.7. Resultados	- 78 -
4.8. Conclusiones de los ensayos de adherencia	- 85 -

Capítulo 5 Estudio experimental del refuerzo a cortante de vigas mediante NSM FRP	- 87 -
5.1. Introducción	- 87 -
5.2. Programa experimental	- 88 -
5.3. Descripción y fabricación de las vigas	- 90 -
5.4. Disposición y geometría de las ranuras de NSM	- 93 -
5.5. Refuerzo de las vigas con NSM FRP	- 94 -
5.6. Descripción de los ensayos e instrumentación	- 96 -
5.7. Resultados	- 98 -
5.7.1. Esfuerzo cortante de rotura	- 98 -
5.7.2. Esfuerzo cortante - desplazamiento	- 101 -
5.7.3. Modos de fallo	- 101 -
5.7.4. Deformación en cercos y FRP	- 105 -
5.7.5. Aplicación del modelo de Rizzo y De Lorenzis a los resultados experimentales	- 109 -
5.7.5.1. Ejemplo de cálculo del modelo de Rizzo y De Lorenzis	- 109 -
5.7.5.2. Comparación de los resultados experimentales con los valores teóricos según el modelo de Rizzo y De Lorenzis	- 110 -
5.8. Conclusiones de los ensayos sobre el refuerzo a cortante	- 112 -
Capítulo 6 Conclusiones y líneas futuras de investigación	- 115 -
6.1. Introducción	- 115 -
6.2. Conclusiones del programa experimental de adherencia	- 116 -
6.3. Conclusiones del programa experimental de cortante	- 116 -
6.4. Líneas de trabajo futuro	- 119 -
Bibliografía	- 123 -
Anejo A Resultados experimentales	- 129 -
A.1. Introducción	- 129 -
A.2. Rotura de las vigas en el refuerzo con NSM FRP	- 129 -
A.3. Curvas carga - deformación en cercos y FRP	- 136 -
A.4. Perfiles de fisuración	- 169 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Apilamiento de láminas en un material compuesto (Barbero, 1999).	- 11 -
Figura 2.2 Diagrama tensión-deformación para diferentes FRP y acero (FIB, 2001)...	- 12 -
Figura 2.3 Proceso de fabricación de la fibra de carbono.	- 15 -
Figura 2.4 Posibilidades de refuerzo con materiales compuestos de tipo FRP.	- 20 -
Figura 2.5 Sistema de refuerzo mediante laminados prefabricados de FRP.	- 22 -
Figura 2.6 Sistemas de refuerzo de fabricación in situ a partir de tejidos de fibra.	- 23 -
Figura 2.7 Sistema de refuerzo mediante NSM FRP.	- 24 -
Figura 3.1 Tipos de ensayo en el estudio del comportamiento adherente (FIB, 2000). .	- 31 -
Figura 3.2 Modos de fallo en ensayos de adherencia (De Lorenzis and Teng, 2007)....	- 33 -
Figura 3.3 Ensayo de <i>pull-out</i> doble (Yan et al., 1999).....	- 34 -
Figura 3.4 Ensayo tipo viga con sección en “T” invertida (De Lorenzis and Nanni, 2002)	- 35 -
Figura 3.5 Ensayo de <i>pull-out</i> con bloque en forma de “C” (De Lorenzis et al., 2002)...	- 36 -
Figura 3.6 Ensayo tipo viga adoptado por Sena-Cruz y Barros (Sena-Cruz and Barros, 2002, 2004).....	- 36 -
Figura 3.7 Ensayo de <i>pull-out</i> adoptado por Seracino et al. (Seracino et al., 2007a).....	- 38 -
Figura 3.8 Leyes de adherencia (De Lorenzis, 2004).....	- 43 -
Figura 3.9 Mecanismos básicos que se movilizan para resistir el esfuerzo cortante según (Taylor, 1974).	- 46 -
Figura 3.10 Ángulo entre las bielas de compresión de hormigón y el eje de la pieza (EHE, 2008).....	- 48 -
Figura 3.11 Cálculo de la longitud adherida en el modelo de Rizzo y De Lorenzis (Rizzo and De Lorenzis, 2009b).	- 59 -
Figura 3.12 Plano de fisura y parámetros de cálculo en el modelo de Bianco et al. (Bianco et al., 2007).....	- 61 -
Figura 4.1 Geometría de las vigas y disposición del ensayo.....	- 70 -

Figura 4.2 Hormigonado de las vigas y probetas testigo.	- 72 -
Figura 4.3 Aspecto de las barras y láminas de FRP empleadas en los ensayos.	- 73 -
Figura 4.4 Determinación del módulo de elasticidad de las láminas en prensa.	- 74 -
Figura 4.5 Realización de la ranura en uno de los bloques que conforman la viga.....	- 75 -
Figura 4.6 Montaje de la probeta en los ensayos de adherencia.....	- 75 -
Figura 4.7 Detalle de los tubos de acero de anclaje (izquierda) y barra instrumentada con banda extensométrica (derecha).	- 76 -
Figura 4.8 Instalación del NSM FRP en los ensayos de adherencia.	- 77 -
Figura 4.9 Medida del deslizamiento en barra (izquierda) o lámina (derecha).	- 78 -
Figura 4.10 Curva carga-tiempo tipo característica.....	- 79 -
Figura 4.11 a) Fallo de adherencia por deslizamiento barra-adhesivo, b) fallo adhesivo-hormigón c) rotura del hormigón.	- 79 -
Figura 4.12 Curvas tensión de adherencia-deslizamiento agrupadas por barras o láminas y longitudes de adherencia	- 80 -
Figura 4.13 Representación de los valores medios de las fuerzas de arrancamiento y tensiones medias de adherencia de barras y láminas para las distintas longitudes de anclaje.	- 84 -
Figura 4.14 Deformaciones medidas por las bandas en el centro de la viga y en el centro de la zona de adherencia y obtenidos según la fórmula 4.2.	- 85 -
Figura 5.1 Programa experimental. Configuraciones de refuerzo a cortante con NSM FRP ..	- 89 -
Figura 5.2 Geometría y armado de las vigas en el refuerzo a cortante con NSM FRP. .	- 90 -
Figura 5.3 Armadura de las vigas.	- 90 -
Figura 5.4 Localización de la instrumentación en los cercos.	- 91 -
Figura 5.5 Instrumentación de la armadura de las vigas.....	- 91 -
Figura 5.6 Hormigonado de las vigas.	- 92 -
Figura 5.7 Moldes empleados para la fabricación de las vigas.....	- 93 -
Figura 5.8 Hormigonado de las probetas testigo.....	- 93 -
Figura 5.9 Dimensiones de las ranuras.	- 94 -
Figura 5.10 Ejecución de ranuras en las caras laterales de las vigas.	- 94 -
Figura 5.11 Instrumentación de los refuerzos de CFRP.....	- 95 -
Figura 5.12 Proceso de refuerzo de una viga.....	- 96 -
Figura 5.13 Configuración de los ensayos en el refuerzo a cortante con NSM FRP.....	- 97 -

Figura 5.14 Configuración de los dos ensayos realizados sobre cada viga.	- 97 -
Figura 5.15 Instrumentación en el refuerzo a cortante con NSM FRP.....	- 98 -
Figura 5.16 Curvas cortante-desplazamiento en el refuerzo a cortante mediante NSM FRP.	- 101 -
Figura 5.17 Perfil de fisuración Referencia (S).	- 102 -
Figura 5.18 Perfil de fisuración B90-3a(S).	- 103 -
Figura 5.19 Perfil de fisuración L90-6b(L).	- 103 -
Figura 5.20 Perfil de fisuración L45-3b(S).	- 104 -
Figura 5.21 Perfil de fisuración L45-6a(L).	- 104 -
Figura 5.22 Perfil de fisuración L45-6b(L).	- 104 -
Figura 5.23 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga Referencia.	- 105 -
Figura 5.24 Perfil de fisuras de la viga de referencia. Der. Vano largo (L) e Izq. Vano corto (S).	- 106 -
Figura 5.25 Curvas cortante-deformación en cercos (izq.) y FRP (der.) en la viga B90-3a(S).	- 107 -
Figura 5.26 Perfil de fisuración de la viga B90-3a(S).	- 107 -
Figura 5.27 Curvas cortante-deformación cercos (izq.) y FRP (der.) en la viga B45-3a(L)...	- 107 -
Figura 5.28 Perfil de fisuración de la viga B45-3a(L).	- 107 -
Figura 5.29 Curvas cortante-deformación cercos (izq.) y FRP (der.) en la viga L90-3a(L)	- 108 -
Figura 5.30 Perfil de fisuración de la viga L90-3a(L)	- 108 -
Figura 5.31 Curvas cortante-deformación cercos (izq.) y FRP (der.) en la viga L45-3a(S)...	- 108 -
Figura 5.32 Perfil de fisuración de la viga L45-3a(S).	- 108 -
Figura 5.33 Longitudes de adherencia para la viga L45-3b(L). Rizzo y De Lorenzis. ...	- 110 -
 Figura A.1 Rotura de la viga Referencia (L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.....	 - 129 -
Figura A.2 Rotura de la viga Referencia (S). Lado derecho e izquierdo respectivamente	- 129 -
Figura A.3 Rotura de la viga B90-3a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .-	- 130 -
Figura A.4 Rotura de la viga B90-3a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .-	- 130 -
Figura A.5 Rotura de la viga B90-6a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .-	- 130 -

Figura A.6 Rotura de la viga B90-6a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	130 -
Figura A.7 Rotura de la viga B45-3a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	130 -
Figura A.8 Rotura de la viga B45-3a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	131 -
Figura A.9 Rotura de la viga L45-3a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	131 -
Figura A.10 Rotura de la viga L45-3a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	131 -
Figura A.11 Rotura de la viga L90-3a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	131 -
Figura A.12 Rotura de la viga L90-6a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	131 -
Figura A.13 Rotura de la viga L90-6a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	132 -
Figura A.14 Rotura de la viga B45-6a(L). Lado derecho.	132 -
Figura A.15 Rotura de la viga B45-6a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	132 -
Figura A.16 Rotura de la viga L45-6a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	132 -
Figura A.17 Rotura de la viga L45-6a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	132 -
Figura A.18 Rotura de la viga B45-3b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	133 -
Figura A.19 Rotura de la viga B45-3b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	133 -
Figura A.20 Rotura de la viga B45-6b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	133 -
Figura A.21 Rotura de la viga B45-6b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	133 -
Figura A.22 Rotura de la viga B90-3b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	134 -
Figura A.23 Rotura de la viga B90-3b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	134 -
Figura A.24 Rotura de la viga B90-6b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	134 -
Figura A.25 Rotura de la viga B90-6b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	134 -
Figura A.26 Rotura de la viga L45-3b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	135 -
Figura A.27 Rotura de la viga L45-3b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	135 -
Figura A.28 Rotura de la viga L45-6b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	135 -
Figura A.29 Rotura de la viga L45-6b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	135 -
Figura A.30 Rotura de la viga L90-3b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	136 -
Figura A.31 Rotura de la viga L90-3b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	136 -
Figura A.32 Rotura de la viga L90-6b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	136 -
Figura A.33 Rotura de la viga L90-6b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente. .	136 -
Figura A.34 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga Referencia (L).	137 -
Figura A.35 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga Referencia (S).	137 -
Figura A.36 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-3a(L).	138 -

Figura A.37 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-3a(L).	- 138 -
Figura A.38 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-3a(S).	- 139 -
Figura A.39 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-3a(S).	- 139 -
Figura A.40 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-6a(L).	- 140 -
Figura A.41 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-6a(L).	- 140 -
Figura A.42 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-6a(S).	- 141 -
Figura A.43 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-6a(S).	- 141 -
Figura A.44 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-3a(L).	- 142 -
Figura A.45 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-3a(L).	- 142 -
Figura A.46 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-3a(S).	- 143 -
Figura A.47 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-3a(S).	- 143 -
Figura A.48 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-3a(L).	- 144 -
Figura A.49 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-3a(L).	- 144 -
Figura A.50 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-3a(S).	- 145 -
Figura A.51 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-3a(S).	- 145 -
Figura A.52 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-3a(L).	- 146 -
Figura A.53 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-3a(L).	- 146 -
Figura A.54 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-3a(S).	- 147 -
Figura A.55 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-3a(S).	- 147 -
Figura A.56 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-6a(L).	- 148 -
Figura A.57 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-6a(L).	- 148 -
Figura A.58 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-6a(S).	- 149 -
Figura A.59 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-6a(S).	- 149 -
Figura A.60 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-6a(L).	- 150 -
Figura A.61 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-6a(L).	- 150 -
Figura A.62 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-6a(S).	- 151 -
Figura A.63 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-6a(S).	- 151 -
Figura A.64 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-6a(L).	- 152 -
Figura A.65 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-6a(L).	- 152 -
Figura A.66 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-6a(S).	- 153 -
Figura A.67 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-3b(L).	- 154 -

Figura A.68 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-3b(S).....	- 155 -
Figura A.69 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-3b(S).	- 155 -
Figura A.70 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-6b(L).	- 156 -
Figura A.71 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-6b(L).....	- 156 -
Figura A.72 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-6b(S).....	- 157 -
Figura A.73 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-6b(S).	- 157 -
Figura A.74 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-3b(L).	- 158 -
Figura A.75 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-3b(S).....	- 159 -
Figura A.76 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-3b(S).	- 159 -
Figura A.77 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-6b(L).	- 160 -
Figura A.78 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-6b(S).....	- 161 -
Figura A.79 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-6b(S).	- 161 -
Figura A.80 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-3b(L).....	- 162 -
Figura A.81 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-3b(L).	- 162 -
Figura A.82 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-3b(S).	- 163 -
Figura A.83 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-3b(S).....	- 163 -
Figura A.84 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-6b(L).....	- 164 -
Figura A.85 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-6b(L).	- 164 -
Figura A.86 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-6b(S).	- 165 -
Figura A.87 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-6b(S).....	- 165 -
Figura A.88 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-3b(L).....	- 166 -
Figura A.89 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-3b(L).	- 166 -
Figura A.90 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-3b(S).	- 167 -
Figura A.91 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-3b(S).....	- 167 -
Figura A.92 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-6b(L).....	- 168 -
Figura A.93 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-6b(L).	- 168 -
Figura A.94 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-6b(S).....	- 169 -
Figura A.95 Perfil de fisuración de la viga Referencia (L).	- 169 -
Figura A.96 Perfil de fisuración de la viga Referencia (S).....	- 170 -
Figura A.97 Perfil de fisuración de la viga B90-3a(L).	- 170 -
Figura A.98 Perfil de fisuración de la viga B90-3a(S).....	- 170 -

Figura A.99 Perfil de fisuración de la viga B90-6a(L).	- 170 -
Figura A.100 Perfil de fisuración de la viga B90-6a(S).	- 171 -
Figura A.101 Perfil de fisuración de la viga B45-3a(L).	- 171 -
Figura A.102 Perfil de fisuración de la viga B45-3a(S).	- 171 -
Figura A.103 Perfil de fisuración de la viga L45-3a(L).	- 171 -
Figura A.104 Perfil de fisuración de la viga L45-3a(S).	- 172 -
Figura A.105 Perfil de fisuración de la viga L90-3a(L).	- 172 -
Figura A.106 Perfil de fisuración de la viga L90-3a(S).	- 172 -
Figura A.107 Perfil de fisuración de la viga L90-6a(L).	- 172 -
Figura A.108 Perfil de fisuración de la viga L90-6a(S).	- 173 -
Figura A.109 Perfil de fisuración de la viga B45-6a(L).	- 173 -
Figura A.110 Perfil de fisuración de la viga B45-6a(S).	- 173 -
Figura A.111 Perfil de fisuración de la viga L45-6a(L).	- 173 -
Figura A.112 Perfil de fisuración de la viga L45-6a(S).	- 174 -
Figura A.113 Perfil de fisuración de la viga B45-3b(L).	- 174 -
Figura A.114 Perfil de fisuración de la viga B45-3b(S).	- 174 -
Figura A.115 Perfil de fisuración de la viga B45-6b(L).	- 174 -
Figura A.116 Perfil de fisuración de la viga B45-6b(S).	- 175 -
Figura A.117 Perfil de fisuración de la viga B90-3b(L).	- 175 -
Figura A.118 Perfil de fisuración de la viga B90-3b(S).	- 175 -
Figura A.119 Perfil de fisuración de la viga B90-6b(L).	- 175 -
Figura A.120 Perfil de fisuración de la viga B90-6b(S).	- 176 -
Figura A.121 Perfil de fisuración de la viga L45-3b(L).	- 176 -
Figura A.122 Perfil de fisuración de la viga L45-3b(S).	- 176 -
Figura A.123 Perfil de fisuración de la viga L45-6b(L).	- 176 -
Figura A.124 Perfil de fisuración de la viga L45-6b(S).	- 177 -
Figura A.125 Perfil de fisuración de la viga L90-3b(L).	- 177 -
Figura A.126 Perfil de fisuración de la viga L90-3b(S).	- 177 -
Figura A.127 Perfil de fisuración de la viga L90-6b(L).	- 177 -
Figura A.128 Perfil de fisuración de la viga L90-6b(S).	- 178 -

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de barras de FRP con un contenido en fibra entre el 50-70%.....	- 12 -
Tabla 2.2 Propiedades mecánicas características de las fibras (Täljsten, 2002).	- 13 -
Tabla 2.3 Composición de diferentes tipos de fibra de vidrio (% en peso) (Olivares et al., 2003).....	- 14 -
Tabla 2.4 Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio (Miravete, 2000).	- 15 -
Tabla 2.5 Propiedades de distintos tipos de fibra de carbono.....	- 16 -
Tabla 2.6 Propiedades de distintos tipos de fibra de aramida.....	- 17 -
Tabla 2.7 Propiedades mecánicas típicas de las resinas (Täljsten, 2002).	- 18 -
Tabla 2.8 Tipos de resinas de poliéster y sus aplicaciones (Olivares et al., 2003).	- 19 -
Tabla 2.9 Propiedades más comunes de los adhesivos epoxi, hormigón y acero (Täljsten, 2002).....	- 26 -
Tabla 4.1 Programa de ensayos en el estudio de la adherencia del NSM FRP.	- 69 -
Tabla 4.2 Propiedades de las barras (MBrace Mbar 165/2500) y láminas (MBrace Cut-In) . .	- 73 -
Tabla 4.3 Tensión de adherencia para barra. Longitud adherida 48 mm.....	- 81 -
Tabla 4.4 Tensión de adherencia para barra. Longitud adherida 96 mm.....	- 81 -
Tabla 4.5 Tensión de adherencia para barra. Longitud adherida 144 mm.....	- 82 -
Tabla 4.6 Tensión de adherencia para lámina. Longitud adherida 48 mm.	- 82 -
Tabla 4.7 Tensión de adherencia para lámina. Longitud adherida 96 mm.	- 82 -
Tabla 4.8 Tensión de adherencia para lámina. Longitud adherida 144 mm.	- 83 -
Tabla 4.9 Tensión de adherencia barra – lámina.	- 83 -
Tabla 5.1 Programa experimental de ensayos sobre el refuerzo a cortante con NSM FRP . .	- 89 -
Tabla 5.2 Resultados experimentales cortante.....	- 99 -
Tabla 5.3 Incremento de resistencia a cortadura. Modelo de Rizzo y De Lorenzis.	- 111 -

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

El aumento del envejecimiento y deterioro de las infraestructuras y edificaciones existentes a nivel mundial ha motivado el interés de instituciones y grupos de investigación hacia la búsqueda de nuevos materiales y técnicas que permitan la rehabilitación y refuerzo de los diferentes elementos estructurales que conforman una determinada estructura de manera más eficiente en relación a los métodos de refuerzo tradicionalmente empleados (Täljsten, 2002, Teng et al., 2002). Pero no es sólo el envejecimiento natural de las estructuras lo que motiva su rehabilitación o refuerzo. Errores cometidos durante su fase de diseño, cálculo o ejecución pueden obligar a reforzar determinados elementos de una estructura antes incluso de su puesta en funcionamiento. El cambio en la demanda de uso, actualizaciones normativas o, en casos extremos, accidentes o desastres naturales son otros factores que pueden obligar a reforzar una determinada estructura o, incluso, forzar su reemplazo. Desde el punto de vista de la sostenibilidad, tanto de los materiales como económica, la sustitución de las infraestructuras y edificaciones existentes no parece la solución más razonable siempre y cuando sea factible técnica y económicamente su rehabilitación. En todo caso, el refuerzo debe siempre considerarse como una destacada alternativa para prolongar la vida útil de las estructuras.

En este contexto, el empleo de materiales compuestos de matriz polimérica y reforzados con fibras, conocidos comúnmente bajo las siglas anglosajonas FRP (*Fibre Reinforced Polymer*), en la rehabilitación y refuerzo de estructuras de hormigón armado, u otro tipo de materiales estructurales, ha experimentado un notable auge y

crecimiento en los últimos años que se espera se prolongue en el futuro como alternativa a los métodos tradicionales de refuerzo comúnmente manejados en el sector de la construcción. Este interés viene motivado por las principales ventajas que presenta este tipo de sistema de refuerzo respecto a otras alternativas de intervención entre las que cabe destacar su facilidad de instalación, su durabilidad, su elevada relación resistencia/peso o su bajo coste de mantenimiento. Consecuentemente se han desarrollado en diferentes países de nuestro entorno guías y recomendaciones de diseño y cálculo orientadas al correcto dimensionamiento y aplicación de esta relativamente nueva modalidad de refuerzo en cuanto al tipo de materiales empleados (FIB, 2001, CNR-DT-200, 2004, ACI-440.2R, 2008, TR55, 2012).

Los FRP han sido ampliamente utilizados en otras áreas de la ingeniería tales como la industria aeronáutica o la industria aeroespacial, sectores que proporcionan una importante experiencia en el uso de este tipo de materiales. Esta experiencia, sin embargo, no puede ser directamente transferida al sector de la construcción debido a los diferentes criterios de diseño que rigen cada industria como, por ejemplo, el tipo de cargas aplicadas, durabilidad, vida en servicio o coste económico admisible (Täljsten, 2002). No obstante, en base a la experiencia previa acumulada en el uso de los FRP en éstas y otras áreas, junto con el considerable número de investigaciones realizadas hasta la fecha sobre el refuerzo de estructuras con materiales compuestos, el refuerzo con FRP se muestra como un método muy eficaz para incrementar la capacidad resistente de elementos estructurales de hormigón armado frente a esfuerzos de flexión, cortante o compresión.

En general, el refuerzo estructural con FRP se puede englobar en la actualidad bajo dos modalidades de refuerzo de dispar desarrollo. Por un lado, el material compuesto (en forma de laminados prefabricados o conformado in situ a partir de tejidos de fibra) puede ser adherido externamente sobre la superficie del elemento a reforzar bajo diferentes configuraciones en función del tipo de refuerzo considerado y el tipo de elemento a reforzar (flexión, cortante; vigas, losas, nudos viga-columna, pilares, etc.). El pegado externo de laminados de FRP ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones prácticas para refuerzos a flexión, cortante o compresión, y la totalidad de guías de diseño publicadas sobre la materia describen extensamente los diferentes criterios de diseño y cálculo para las distintas aplicaciones desarrolladas. Por otro lado, como alternativa o incluso como complemento al pegado externo de laminados, el refuerzo de FRP, en forma de barra o lámina de reducida sección, puede ser insertado y adherido en el recubrimiento de hormigón del elemento a reforzar a través de ranuras realizadas en su superficie. Esta última técnica de refuerzo con materiales compuestos, conocida comúnmente bajo las siglas NSM (*Near-Surface Mounted*), presenta una serie de ventajas respecto al pegado externo de laminados de FRP y solventa, en mayor o menor grado, algunas de sus limitaciones. Sin embargo, debido

en parte a su menor desarrollo, el refuerzo mediante NSM FRP no se encuentra tan implementado en intervenciones de rehabilitación y refuerzo de estructuras como el pegado externo, y sólo algunas de las nuevas guías de diseño publicadas sobre refuerzo con materiales compuestos contemplan parcialmente entre su articulado esta modalidad de refuerzo (ACI-440.2R, 2008, TR55, 2012).

Las investigaciones y aplicaciones prácticas realizadas hasta la fecha, tal y como se introducía previamente, han demostrado una notable efectividad del refuerzo externo mediante FRP para incrementar la capacidad resistente última de diferentes elementos estructurales de hormigón armado. Sin embargo, aún quedan muchos aspectos sobre el comportamiento de este tipo de refuerzos en los que es necesario profundizar, especialmente en la modalidad de refuerzo mediante NSM FRP cuyo desarrollo y uso es actualmente inferior a pesar de sus potenciales ventajas. Para el caso particular del refuerzo frente a esfuerzos de cortadura mediante NSM FRP, los estudios y aplicaciones prácticas realizadas son incluso más escasas debido, en cierta medida, a la mayor complejidad que encierra en sí mismo la propia resistencia a cortadura en elementos de hormigón armado, la falta de modelos analíticos que cuantifiquen de forma fiable dicha resistencia, así como la propia complejidad añadida que supone, en este caso, la instalación del refuerzo externo de NSM FRP.

Los antecedentes anteriormente introducidos son los que dan origen al tema principal objeto de este trabajo, encaminado fundamentalmente al estudio del refuerzo a cortadura de elementos lineales de hormigón armado mediante NSM FRP. En base a este estudio se asienta otro de los temas objeto de este trabajo, orientado en este caso, al estudio del comportamiento adherente del refuerzo de NSM FRP.

1.2. Alcance y objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el estudio del comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortadura mediante barras y láminas de fibra de carbono embebidas en una matriz epoxi (CFRP) e insertadas en ranuras realizadas en el recubrimiento superficial de hormigón del elemento a reforzar (NSM). Los estudios realizados sobre este tipo de refuerzo son, aún, muy escasos a pesar de las ventajas que presenta este método de refuerzo, hecho que limita en cierta medida su aplicación práctica final. Con este trabajo se pretende profundizar en el entendimiento de los mecanismos de resistencia actuantes para este tipo particular de refuerzo con materiales compuestos de tipo FRP.

En base al objetivo principal planteado previamente se desarrolla otro objetivo ligado al estudio del comportamiento adherente de las barras y láminas de CFRP empleadas como refuerzo de elementos de hormigón armado mediante NSM. La principal limitación del refuerzo externo con FRP en sus diferentes aplicaciones es, en general,

la pérdida de adherencia entre el refuerzo de FRP y la base de hormigón de forma que no se consigue movilizar toda la capacidad resistente del material de refuerzo instalado. Con este trabajo se pretende también avanzar en el conocimiento del comportamiento adherente entre el refuerzo de NSM FRP y el hormigón aplicado fundamentalmente en el refuerzo a cortadura de vigas de hormigón armado.

1.3. Organización del contenido

Este trabajo de tesis se compone de un total de seis capítulos con los que se ha tratado de introducir paulatinamente al lector en el contexto del refuerzo de estructuras de hormigón armado con materiales compuestos de tipo FRP, así como en los distintos temas objeto tratados en el mismo orientados éstos al refuerzo mediante NSM FRP. En base a ello, se describen brevemente a continuación los diferentes capítulos desarrollados a lo largo del documento.

En el presente capítulo se hace una breve introducción a los antecedentes que motivan y justifican en su conjunto parte de este estudio y se definen a su vez los principales objetivos a alcanzar con el mismo junto con la estructura seguida para el desarrollo de éstos.

Seguidamente en el Capítulo 2 se introducen brevemente los principales métodos de refuerzo con materiales compuestos utilizados en la actualidad, así como las características principales y propiedades fundamentales de los FRP típicamente empleados en el refuerzo de estructuras de hormigón armado con materiales compuestos.

En el Capítulo 3 se aborda el problema del refuerzo a cortadura de vigas de hormigón armado mediante NSM FRP. En la primera parte del capítulo se trata la adherencia entre el refuerzo y el hormigón en esta clase de refuerzo, presentándose los principales factores de los que depende y los distintos mecanismos de fallo documentados asociados a la unión adhesiva NSM FRP y hormigón. Se describen a su vez los principales estudios experimentales realizados hasta la fecha dirigidos al estudio del comportamiento adherente del refuerzo con NSM FRP. A continuación, en la segunda parte del Capítulo 3 se introducen los mecanismos de resistencia frente a esfuerzos de cortadura de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortadura mediante NSM FRP y se describen los principales estudios experimentales realizados sobre dicho tipo de refuerzo.

En el Capítulo 4 se describe el programa experimental realizado con objeto de estudiar el comportamiento adherente de barras y láminas de NSM CFRP en elementos de hormigón.

De igual manera, en el Capítulo 5 se detalla el programa experimental realizado para el estudio del comportamiento a cortadura de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortante mediante barras y láminas de NSM CFRP.

En el Capítulo 6 se indican las principales conclusiones obtenidas para cada uno de los diferentes aspectos tratados a lo largo del documento, así como algunas indicaciones de posibles líneas de trabajo futuras.

Finalmente se incluyen las referencias bibliográficas y un anejo con los resultados experimentales.

CAPÍTULO 2

INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE REFUERZO CON MATERIALES COMPUESTOS

2.1. Introducción

A lo largo de la vida en servicio de una estructura o edificación genérica de hormigón armado es relativamente común que, como consecuencia de la prolongada vida útil prevista para la misma, sea necesario que ésta se vea sometida a algún tipo de rehabilitación o refuerzo con objeto de restituir y/o mejorar su capacidad resistente o de servicio.

Este refuerzo puede venir motivado por diferentes causas a lo largo de dicha vida en servicio, como por ejemplo, errores cometidos durante la fase de diseño, cálculo y/o construcción de alguno de los elementos estructurales que conforman la estructura, baja calidad de los materiales empleados, falta de mantenimiento o mantenimiento inadecuado, cambios en el uso de la estructura o aumento de las cargas a que va a estar sometida, actuación de acciones accidentales de distinta naturaleza que afecten a la capacidad resistente de la estructura o, en algún caso, cambios en la normativa vigente o del conocimiento establecido.

En función del tipo de elemento estructural objeto del refuerzo, las solicitaciones aplicadas al mismo, así como otras particularidades intrínsecas ligadas a cada intervención, existen diferentes alternativas de refuerzo todas ellas efectivas en mayor o menor grado, aunque cada una de las cuales presenta, en su conjunto, una serie de ventajas e inconvenientes que condicionan su utilización final.

Entre las distintas opciones de refuerzo empleadas cabe señalar los métodos tradicionales, por su amplia utilización y tipo de materiales empleados, tales como el recrecio de la sección con hormigón, el empleo de perfilería metálica anexa o la adhesión externa de bandas de acero. Más recientemente el empleo de materiales compuestos de matriz polimérica y reforzados con fibras (FRP) como material de refuerzo de elementos estructurales de hormigón armado ha experimentado un notable desarrollo durante los últimos años como alternativa a los métodos y materiales utilizados tradicionalmente.

Entre los sistemas tradicionales de refuerzo, el más común es el empleo de láminas de acero como refuerzo externo. Es una técnica de refuerzo eficaz, como demuestran las numerosas aplicaciones prácticas realizadas hasta el momento, pero presenta, sin embargo, una serie de potenciales inconvenientes. Las láminas de acero tienen un peso relativamente elevado que dificulta su manejo, transporte e instalación, lo que limita la longitud máxima de los elementos de refuerzo con objeto de minimizar las dificultades indicadas anteriormente, aumentando, con ello, el número de uniones entre elementos necesarias, con las dificultades que siempre representan éstas.

Este tipo de refuerzos requieren la instalación de medios auxiliares importantes que son empleados durante relativamente largos periodos de tiempo, lo que puede llegar a ocasionar molestias o problemas de distinta índole como, por ejemplo, cortes de tráfico prolongados en vías con tránsito importante de vehículos, o cierre de instalaciones de distinta naturaleza con las consiguientes pérdidas económicas asociadas. Otro problema de este tipo de refuerzo es la posible corrosión ligada al acero que puede afectar, bajo determinadas condiciones, a la adherencia de la unión adhesiva y por consiguiente a la efectividad del refuerzo. Además, debido a la gran rigidez que presentan las láminas de acero, se requiere de una elevada planeidad en las superficies de pegado para la correcta aplicación.

El empleo de materiales compuestos de tipo FRP resuelve en gran medida los inconvenientes presentados anteriormente relativos al refuerzo externo mediante láminas de acero. La densidad de este tipo de material es muy inferior a la del acero, lo que permite una mayor maniobrabilidad y facilidad de instalación, requiriéndose medios auxiliares ligeros con plazos de puesta en obra muy reducidos.

La morfología de este tipo de materiales permite el transporte e instalación de grandes longitudes de material evitando con ello la problemática de las uniones. No se ven afectados por problemas de corrosión y en este sentido la adherencia entre el hormigón y el refuerzo no se vería afectada. Como inconvenientes se suelen indicar, entre otros, la sensibilidad a la temperatura (incluso con temperaturas no excesivamente elevadas) de la matriz polimérica que conforma el FRP o el adhesivo

estructural típicamente empleado. Aunque, para este último caso, la degradación del adhesivo afecta de igual manera a otros métodos de refuerzo convencionales.

Adicionalmente, los materiales compuestos presentan, en general, un precio inicial superior al del acero, al menos por unidad de peso, aunque si se considera la resistencia específica de los materiales considerados, el ahorro debido al empleo de medios auxiliares más ligeros o los plazos de ejecución menores, puede verse compensado en gran medida el precio inicial superior de esta clase de materiales.

Las investigaciones sobre el uso de materiales compuestos de tipo FRP en el refuerzo de estructuras de hormigón armado se iniciaron en el Laboratorio Suizo de Ensayos y Desarrollo de Materiales (EMPA) a finales de los ochenta (Bank, 2006). Los primeros estudios se centraron en el pegado externo de laminados de FRP para el refuerzo a flexión de vigas de hormigón armado, pero pronto se ampliaron a otras áreas como el refuerzo a cortante, el refuerzo a torsión o el refuerzo a compresión (confinamiento) de pilares. Algunas de estas técnicas de refuerzo progresaron rápidamente en base a la experiencia previa acumulada con procedimientos de refuerzo similares realizados con acero.

Con posterioridad, e inicialmente como alternativa al pegado externo de laminados de FRP, se realizaron los primeros estudios sobre el refuerzo mediante barras y láminas de FRP insertadas en el recubrimiento de hormigón a través de ranuras realizadas en la superficie del elemento (NSM FRP). Dichos estudios se centraron en el refuerzo a flexión y cortante de elementos de hormigón y al igual que sucedía con el pegado externo de laminados partieron de experiencias similares realizadas previamente con barras de acero (De Lorenzis and Nanni, 2001).

En la actualidad, el refuerzo mediante materiales compuestos de tipo FRP es, en general, un método de refuerzo plenamente consolidado como demuestran las numerosas aplicaciones prácticas realizadas hasta el momento. A pesar de ello, y en función de la tipología de refuerzo, quedan aún muchos aspectos en los que se hace necesario profundizar para caracterizar completamente los distintos procedimientos de refuerzo con materiales compuestos.

2.2. Aspectos generales de los materiales compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras (FRP)

Los materiales compuestos se clasifican y definen de diversas maneras en función de las ideas o conceptos que interesen identificar en cada momento. En términos generales, se considera que un material compuesto es un material multifase que conserva una proporción significativa de las propiedades de las fases constituyentes de modo que presente la mejor combinación posible entre ellas (Callister, 2007).

De acuerdo con este principio, los materiales compuestos se podrían clasificar con carácter general en (Hull, 1987): materiales compuestos naturales (madera, bambú, huesos, etc.), materiales microcompuestos (aleaciones metálicas, termoplásticos endurecidos, etc.) y materiales macrocompuestos (hormigón armado, acero galvanizado, etc.).

En el presente contexto, el término material compuesto se reserva a la combinación artificial de dos o más componentes que permanecen macroscópicamente separados, pero se comportan como un único material cuyas propiedades resultantes presentan ventajas sobre las de sus constituyentes por separado. Se limita por tanto el término de material compuesto a aquellos materiales de relativa reciente creación y altas prestaciones que combinan metales, cerámicas o resinas poliméricas con fibras o partículas de determinados materiales.

Los materiales compuestos se componen, fundamentalmente, de una matriz o fase continua y un refuerzo o fase dispersa. Comparativamente, la matriz suele tener inferiores propiedades mecánicas y su misión principal es soportar y cohesionar el refuerzo. Por otro lado, el refuerzo aporta la rigidez y la resistencia al conjunto y es el responsable en gran medida de las propiedades mecánicas finales del material.

En función del tipo de refuerzo o la naturaleza de la matriz, los materiales compuestos pueden clasificarse nuevamente de diferentes maneras. En base a la tipología del refuerzo se tienen materiales compuestos reforzados con fibras largas, cortas o partículas; y en función de la naturaleza de la matriz se tienen compuestos de matriz polimérica, metálica o cerámica.

Dentro de los materiales compuestos con aplicación en ingeniería, los que presentan una mayor difusión son aquellos materiales formados por una matriz orgánica o polimérica reforzada mediante fibras largas de distinta naturaleza. Los materiales compuestos así constituidos son comúnmente conocidos bajo las siglas FRP ya indicadas anteriormente.

La morfología general de esta clase de material es de tipo laminado, es decir, apilamiento de un conjunto de láminas cada una de las cuales contiene fibras de refuerzo en determinadas direcciones (Figura 2.1). Las propiedades finales del material compuesto dependerán en parte de las propiedades propias de los constituyentes así como de la distribución geométrica de éstos.

Figura 2.1 Apilamiento de láminas en un material compuesto (Barbero, 1999).

Contrariamente a los materiales intensivamente utilizados en ingeniería civil, tales como el acero o el hormigón, que cuentan con una larga experiencia en su aplicación y numerosos estudios teóricos y experimentales realizados durante décadas de investigación, fruto de los cuales existen completas especificaciones técnicas y de diseño, los materiales compuestos empleados como refuerzo en elementos de hormigón armado no cuentan con una tan amplia experiencia y las guías de diseño y cálculo publicadas no son tan abundantes. Se debe por tanto prestar especial atención a la correcta elección de los materiales constituyentes así como a su fabricación y aplicación final para adecuar éstos a las particularidades ligadas al refuerzo de estructuras de hormigón armado.

2.2.1. Materiales constituyentes de los FRP

La lista de materiales candidatos para el refuerzo (fibras) y la matriz en un material compuesto de tipo FRP es amplia, sin embargo, no todas las combinaciones posibles fibra-matriz son apropiadas. En función de las propiedades mecánicas requeridas y la propia aplicación final del material, un número reducido de fibras y matrices son típicamente utilizadas.

En el campo del refuerzo de estructuras de hormigón armado mediante materiales compuestos, tres son las fibras que principalmente se utilizan: fibra de carbono, fibra de vidrio y fibra de aramida (FIB, 2001, CNR-DT-200, 2004, ACI-440.2R, 2008, TR55, 2012). Estas fibras dan lugar a los materiales compuestos de matriz polimérica conocidos comúnmente bajo las siglas CFRP (*Carbon Fibre Reinforced Polymer*), GFRP (*Glass Fibre Reinforced Polymer*) y AFRP (*Aramid Fibre Reinforced Polymer*) respectivamente. Las propiedades físicas y mecánicas varían en función de la fibra empleada pero también en función de la proporción y composición de ésta. En la Tabla 2.1 Se representan las propiedades mecánicas típicas de barras de CFRP, GFRP y AFRP para un volumen aproximado de fibra entre el 50 y 70% (ACI-440.1R, 2006).

Propiedad	Acero	GFRP	CFRP	AFRP
Tensión nominal [MPa]	276-517	-	-	-
Resistencia a tracción [MPa]	483-690	483-1600	600-3690	1720-2540
Módulo de elasticidad [GPa]	200	35-51	120-580	41-125
Deformación de fluencia [%]	0,14-0,25	-	-	-
Deformación de rotura [%]	6,0-12,0	1,2-3,1	0,5-1,7	1,9-4,4

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de barras de FRP con un contenido en fibra entre el 50-70%.

En cuanto a las matrices empleadas en el campo del refuerzo de estructuras, tres son también las matrices típicamente utilizadas, poliéster, viniléster y epoxi (FIB, 2001, CNR-DT-200, 2004, ACI-440.2R, 2008, TR55, 2012). Todas ellas son resinas termoestables que presentan, en general, buena resistencia a agentes químicos, baja viscosidad, fácil procesamiento y buenas propiedades mecánicas. En la Figura 2.2 se compara el comportamiento tenso-deformacional de diferentes materiales compuestos junto con el del acero. Las principales diferencias entre los distintos FRP indicados se centran esencialmente en la rigidez y deformación de rotura del material resultante. Respecto al acero, los FRP siguen un comportamiento elástico lineal hasta rotura, mientras que el acero presenta comportamiento elastoplástico.

Figura 2.2 Diagrama tensión-deformación para diferentes FRP y acero (FIB, 2001).

En los siguientes apartados se presentan con algo más de detalle los distintos constituyentes que conforman los materiales compuestos típicamente utilizados en el refuerzo de estructuras de hormigón armado.

2.2.2. Fibras

Las fibras son las responsables de las principales propiedades mecánicas que presentan los FRP. Estas propiedades varían en función de su cantidad y su disposición dentro de la matriz. En los materiales compuestos de tipo FRP empleados

en el refuerzo estructural se distinguen fundamentalmente tres tipos de fibras: fibra de vidrio, fibra de carbono y fibra de aramida. En la Tabla 2.2 se indican algunas propiedades características de los diferentes tipos de fibras indicados previamente.

Fibra	Módulo elástico [GPa]	Resistencia a tracción [MPa]	Deformación de rotura [%]
Vidrio			
E	72-77	2000-3700	3,0-4,5
S	80-90	3500-4900	4,2-5,4
AR	71-74	3000-3300	3,0-4,3
Aramida			
Bajo módulo	70-80	3500-4100	4,3-5,0
Alto módulo	115-130	3500-4000	2,5-3,5
Carbono			
PAN	230-600	2500-6000	0,9-2,0
Alquitrán	200-800	2100-3100	0,2-0,9

Tabla 2.2 Propiedades mecánicas características de las fibras (Täljsten, 2002).

2.2.2.1. Fibra de vidrio

La fibra de vidrio es el material de refuerzo de mayor aplicación en ingeniería estructural, debido, fundamentalmente, a su gran disponibilidad, sus buenas propiedades mecánicas y su relativo bajo coste. La fibra de vidrio es una fibra inorgánica constituida fundamentalmente por sílice con adiciones de óxidos de calcio, boro, sodio, hierro y aluminio (Olivares et al., 2003). En función de la composición final de la fibra de vidrio, se distinguen diferentes tipos de vidrios con propiedades físico-químicas específicas (Tabla 2.3).

Las principales características de la fibra de vidrio son: alta adherencia fibra-matriz, buenas características eléctricas (es aislante eléctrico y tiene buena permeabilidad dieléctrica), incombustibilidad (no propaga la llama ni origina humos tóxicos), estabilidad dimensional (poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría), imputrescibilidad (no sufre ninguna alteración), baja conductividad térmica y presenta buena resistencia a agentes químicos. En la Tabla 2.4 se indican algunas propiedades mecánicas y físicas de los principales tipos de fibra de vidrio. Entre los tipos de fibra de vidrio más corrientes caben destacar:

- Fibra de vidrio E. Representa la casi totalidad de la fibra de vidrio utilizada como consecuencia de sus buenas propiedades eléctricas, alta durabilidad, baja absorción de agua y bajo coste.

- Fibra de vidrio A. Sus propiedades mecánicas son inferiores a la fibra de vidrio E aunque como contrapartida presenta una gran resistencia de tipo químico.
- Fibra de vidrio B. Se compone de borosilicato de calcio de bajo contenido en álcali. Posee una gran durabilidad y excelentes propiedades eléctricas.
- Fibra de vidrio R o S. Posee unas elevadas propiedades mecánicas, siendo su módulo de elasticidad y resistencia a tracción muy superiores al resto de tipos de vidrio.
- Fibra de vidrio C. Es un tipo de fibra intermedio entre el A y el E. Se utiliza en capas superficiales de elementos expuestos a la corrosión. Muestra una alta resistencia química.
- Fibra de vidrio D. Debido a sus altas propiedades dieléctricas se utiliza sobre todo en la producción de materiales electrónicos para telecomunicaciones y cuando se requiere un material permeable a las ondas electromagnéticas.
- Fibra de vidrio AR. Es el único tipo de vidrio que puede combinarse con el hormigón debido a su resistencia a los álcalis del cemento.

Componentes		Tipos	Sílice (SiO ₂)	Alúmina (Al ₂ O ₃)	Cal (CaO)	Óxido de Magnesio	Óxido de Boro	Flúor	Óxido de Sodio	Óxido de Zirconio	Óxido de Potasio	Óxido de Hierro	Óxido de Titanio	Óxido de Zinc	Fluoruro Cálcico
Eléctrico	E		53-54	14-15	20-24	6,5-9	0-0,7		1					-	-
Resist. a ácidos	A		70-72	0-2,5	5-9	4-1	0-0,5	-	12-15	-	1	-	-	-	-
	C		60-65	2-6	14	1-3	2-7	-	8-10	-	-	-	-	-	-
Resist. a álcalis			65-70	-	4-8	-	-	-	14-20	-	0-3	-	6-12	-	-
			62-75	0-6	-	-	0-6	-	13-21	7-17	-	0-5	0-4	1-10	0-2
Alta resist. mecánica	R		60	25	6	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S		62-65	20-25	-	10-15	0-1,2	-	0-1,1	-	-	-	-	-	-
Dieléctrico	D		73-74	-	0,5-0,6	22-23	-	1,3	-	1,5	-	-	-	-	-

Tabla 2.3 Composición de diferentes tipos de fibra de vidrio (% en peso) (Olivares et al., 2003).

PROPIEDAD	TIPO DE FIBRA			
	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo [μm]	5-13	10-20	10	10
Densidad [kg/m^3]	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad [GPa]	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción [GPa]	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coeficiente de expansión térmica [$10^{-6}/^{\circ}\text{K}$]	8,6	5	5,1	5

Tabla 2.4 Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio (Miravete, 2000).

2.2.2.2. Fibra de carbono

La fibra de carbono es un tipo de fibra que presenta excelentes propiedades mecánicas como son su alto módulo de elasticidad y su elevada resistencia a tracción. Muestra también una excelente respuesta ante la acción de cargas cíclicas o de fatiga, ya que sus propiedades mecánicas apenas se ven afectadas por la aplicación de este tipo de cargas. Presentan como inconvenientes su relativo alto coste, su baja resistencia a impactos de baja energía, y en el caso de contacto con metales, puede favorecer la corrosión de tipo galvánico de éstos.

La fibra de carbono se obtiene a partir de una fibra orgánica previa, denominada precursor, que comúnmente suele ser poliacrilonitrilo (PAN) o alquitrán. Cada tipo de precursor tiene asociado una determinada técnica de procesado pero, en general, todos siguen una secuencia similar: tratamiento térmico e hilado, calentamiento hasta 1000 o 2000°C según el proceso, carbonización, grafitización y tratamiento superficial (Miravete, 2000). En la Figura 2.3 se representa un esquema general del proceso de fabricación de la fibra de carbono.

Figura 2.3 Proceso de fabricación de la fibra de carbono.

En función del proceso de fabricación seguido y las temperaturas de tratamiento alcanzadas se pueden obtener diferentes tipos de fibras de carbono, aunque, en general, se distinguen dos tipos principalmente:

- Fibra de carbono de alto módulo (HM): es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.
- Fibra de carbono de alta resistencia (HR): es la más resistente y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia a tracción.

En la Tabla 2.5 se indican las principales propiedades mecánicas y físicas de los dos tipos de fibra de carbono más representativos (Miravete, 2000).

PROPIEDAD	TIPO DE FIBRA	
	Alto módulo (HM)	Alta resistencia (HR)
Diámetro de hilo [μm]	7	8
Densidad [kg/m^3]	1810-1870	1740-1760
Módulo de elasticidad [GPa]	390	230
Resistencia a tracción [GPa]	2,1-2,7	2,6-5
Alargamiento [%]	0,7	2
Módulo específico	210	130
Coefficiente de expansión térmica [$10^{-6}/^{\circ}\text{K}$]	2,56	2,56

Tabla 2.5 Propiedades de distintos tipos de fibra de carbono.

2.2.2.3. Fibra de aramida

La fibra de aramida es un tipo de fibra de origen orgánico y sintético de elevada resistencia específica a la tracción y al impacto entre otras propiedades. Las fibras de aramida se obtienen mediante un proceso de extrusión e hilado a partir de poliamidas aromáticas del tipo politereftalato de polifenilendiamina. Existen distintos tipos de fibras de aramida disponibles bajo diferentes nombres comerciales (Twaron, Kevlar o Technora), aunque en función del proceso de fabricación se pueden distinguir dos tipos de fibras en función de su rigidez:

- Fibras de aramida de bajo módulo ($E = 70 \text{ GPa}$).
- Fibras de aramida de alto módulo ($E = 130 \text{ GPa}$).

Las principales propiedades de las fibras de aramida son: elevada resistencia específica a la tracción, debido a su alto grado de cristalinidad, alto módulo de

elasticidad (baja elongación a la rotura), buena estabilidad mecánica en el rango térmico $-30^{\circ}\text{C}/200^{\circ}\text{C}$, gran resistencia a ataques químicos, alta resistencia al impacto y alta capacidad de absorción de energía. Como inconvenientes presenta una baja resistencia a compresión y flexión, a diferencia de otras fibras que tiene valores similares para la resistencia a tracción y compresión, la existencia de humedad puede provocar pérdidas en su capacidad resistente entorno al 10% y presenta baja adherencia a determinadas matrices como las termoplásticas. En la Tabla 2.6 se indican las principales propiedades mecánicas y físicas de dos tipos de fibras de aramida representativas comercializadas por DuPont.

PROPIEDAD	TIPO DE FIBRA	
	Kevlar® 29	Kevlar® 49
Diámetro de hilo [μm]	12	12
Densidad [kg/m^3]	1440	1450
Módulo de elasticidad [GPa]	60	128
Resistencia a tracción [GPa]	1,92	2,94-3,6
Módulo específico	41	88

Tabla 2.6 Propiedades de distintos tipos de fibra de aramida.

2.2.3. Matrices

Tal y como se indicaba con anterioridad, el material de refuerzo es el responsable, en gran medida, de las principales propiedades mecánicas del material compuesto resultante, sin embargo, la matriz tiene una influencia notable en su respuesta mecánica y sobre determinadas propiedades.

La matriz desempeña las siguientes funciones esenciales: mantiene las fibras en su posición original, garantiza la transferencia y distribución de los esfuerzos entre las fibras, protege a las fibras de agentes de degradación medioambientales que pudieran afectarlos y limita la deformación de las fibras ante esfuerzos de compresión. En cuanto a su influencia en las propiedades mecánicas del material resultante, la matriz tiene muy poca influencia sobre las propiedades mecánicas de tracción y flexotracción, influye considerablemente sobre las propiedades mecánicas de cortante y, de manera notable, sobre las propiedades mecánicas de compresión.

Las matrices poliméricas, que son las de mayor aplicación en ingeniería, pueden ser divididas en dos grandes grupos: las termoestables y las termoplásticas, siendo las primeras las que aglutinan gran parte de las aplicaciones comerciales. Las matrices termoplásticas se caracterizan porque pueden ser remodeladas bajo condiciones de

presión y temperatura adecuadas. En cuanto a las matrices termoestables polimerizan (curan) en el mismo momento de su fabricación y el aumento de temperatura, aunque no reblandece la matriz como ocurre con las matrices termoplásticas, si puede afectar a las propiedades mecánicas de éstas. Entre las matrices termoestables más utilizadas se encuentran el poliéster, el viniléster y el epoxi. En la Tabla 2.7 se indican algunas propiedades mecánicas de las resinas anteriormente indicadas.

Matriz	Módulo elástico [GPa]	Resistencia a tracción [MPa]	Deformación de rotura [%]
Poliéster	2,1-4,1	20-100	1,0-6,5
Viniléster	3,2	80-90	4,0-5,0
Epoxi	2,5-4,1	55-130	1,5-9,0

Tabla 2.7 Propiedades mecánicas típicas de las resinas (Täljsten, 2002).

2.2.3.1. Resina epoxi

Las resinas epoxi son las resinas más utilizadas en materiales compuestos de altas prestaciones debido, fundamentalmente, a sus excelentes propiedades y su amplio rango de aplicación. En función de las características finales buscadas, las resinas epoxi se pueden convertir en una compleja mezcla de resinas, agentes de curado, aceleradores, catalizadores, modificadores termoplásticos y otros aditivos. Entre sus principales propiedades destacan: buena capacidad de adhesión sobre una gran cantidad de materiales de refuerzo, lo que permite altos porcentajes de fibras, baja contracción durante el curado, buenas propiedades térmicas y eléctricas, y finalmente buena resistencia a ataques de agentes químicos.

2.2.3.2. Resina de poliéster

Este tipo de resina es ampliamente utilizada en el campo de los materiales compuestos, constituyendo cerca del 90% de los laminados comerciales (Miravete, 2000). En su producción industrial, el poliéster se mezcla con un monómero de vinilo, normalmente estireno, que disuelve el poliéster e impide su solidificación. En este punto se tiene una resina insaturada de poliéster de viscosidad controlable en función de las operaciones de procesamiento restantes y las prestaciones finales exigidas. Elementalmente, el poliéster se compone de cuatro constituyentes básicos: el propio poliéster (resina), un disolvente (monómero), un catalizador y un acelerante. Tanto la resina como el monómero forman parte del producto final, el catalizador produce la reacción química para la obtención del producto final y el acelerante aumenta la velocidad de curado.

Existen una gran variedad de resinas de tipo poliéster en función de las aplicaciones finales de las mismas (Tabla 2.8). Se pueden obtener materiales compuestos con distintos niveles de protección frente al fuego, alta resistencia a los rayos ultravioleta y a la humedad, mayor resistencia química o mayor resistencia al impacto. El empleo de distintas clases de catalizadores y aceleradores amplían las posibilidades de aplicación de este tipo de resinas.

TIPOS	APLICACIONES
Ortoftálicas	Barcos, estratificados industriales, placas onduladas y planas
Isoftálicas	<i>Gel coats</i> , depósitos, ingeniería química
Tereftálicas	Ingeniería química, resistencia química mejorada
Tetrahidroftálicas	Depósitos para alimentos, cubas
Bisfenólicas	Aplicaciones anticorrosión
Resinas de Ácido Tetracloroftálico	Comportamiento al fuego mejorado
Resinas de Ácido HET	Resistencia al fuego, anticorrosión
Resinas al Metacrilato de Metilo	Placas, cúpulas

Tabla 2.8 Tipos de resinas de poliéster y sus aplicaciones (Olivares et al., 2003).

2.2.3.3. Resina de viniléster

Las resinas de viniléster se podrían definir como un tipo de resina de propiedades intermedias entre las resinas epoxi y las resinas poliéster. Toman de las primeras sus buenas propiedades físico-químicas y de las segundas sus ciclos de curado relativamente cortos. De una manera análoga a las resinas de poliéster, el viniléster se presenta en disolución con un 30-40% de monómero reactivo, generalmente estireno, y se utilizan los mismos aceleradores y catalizadores empleados para el poliéster. Las resinas de viniléster poseen mejores propiedades mecánicas, químicas y térmicas que las de poliéster. Poseen un alto grado de resiliencia, buena resistencia a la fatiga y la contracción durante el curado es bastante menor que en las resinas de poliéster. Muestran excelente fluidez, lo que facilita la impregnación y manipulación durante el moldeo. Presentan también buena adhesión sobre las fibras de refuerzo y buena resistencia al fuego, aunque no son autoextinguibles, esta propiedad puede obtenerse a través de modificaciones.

2.3. Sistemas de refuerzo con FRP

Los sistemas de refuerzo mediante materiales compuestos de tipo FRP pueden ser utilizados satisfactoriamente en el refuerzo de diferentes elementos estructurales tales

como vigas, muros, losas, nudos viga-columna o pilares, así como en el refuerzo de huecos abiertos en muros o losas (Figura 2.4) (Täljsten, 2002). Los sistemas de refuerzo con FRP pueden catalogarse de distintas maneras en función del tipo de elemento estructural a reforzar (vigas, muros, losas, etc.), los materiales involucrados (elementos de mampostería, hormigón, madera, etc.), los esfuerzos considerados (refuerzo frente a esfuerzo de flexión, cortante o compresión), morfología del material de refuerzo (prefabricado o de conformación in situ) o método de refuerzo aplicado (pegado externo o inserción en el recubrimiento).

Figura 2.4 Posibilidades de refuerzo con materiales compuestos de tipo FRP.

Cada tipología de refuerzo mediante FRP presenta ciertas singularidades a tener en cuenta a la hora de abordar su aplicación, sin embargo, pueden distinguirse tres pasos básicos de aplicación común: preparación de la superficie, instalación del refuerzo y acabado final.

- Preparación de la superficie. Ésta se centra esencialmente en la eliminación de las partes blandas de la superficie que puedan afectar negativamente al comportamiento adherente de la unión. A su vez, en el momento de la instalación del refuerzo de FRP, la superficie debe encontrarse completamente seca y libre de polvo, grasa o cualquier otro tipo de impureza que pueda afectar a la adherencia. En función del método de refuerzo seleccionado puede ser también necesario como parte de la preparación de la superficie la nivelación de ésta, el redondeo de aristas o realización de ranuras sobre la misma (NSM).
- Instalación del refuerzo. La disposición del refuerzo externo de FRP depende de la tipología de refuerzo aplicado aunque simplificada puede reducirse

a la unión adhesiva entre el FRP y el elemento a reforzar. Se debe prestar especial atención a las condiciones de curado o endurecimiento del adhesivo empleado, garantizándose durante dicho proceso una temperatura de al menos 10°C. En caso de no alcanzarse este umbral, deben instalarse fuentes externas de calor que proporcionen las condiciones de temperatura adecuadas.

- **Acabado final.** En general, el refuerzo externo mediante FRP en sus múltiples aplicaciones no altera significativamente la apariencia externa del elemento reforzado, sin embargo, puede ser conveniente la realización de algún tipo de acabado final que mejore la apariencia estética del conjunto. A su vez, puede ser también beneficioso la instalación de algún sistema de protección que mejore aspectos como, por ejemplo, posibles daños ocasionados por impacto o actos vandálicos así como la resistencia frente al fuego.

Tal y como se indicaba previamente, los sistemas de refuerzo con FRP pueden subdividirse de diferentes maneras en función de las características ligadas a cada tipología de refuerzo, sin embargo, todas ellas pueden englobarse adecuadamente bajo las dos modalidades de refuerzo con FRP comúnmente aplicadas: pegado externo de laminados e inserción del refuerzo en el recubrimiento (NSM).

2.3.1. Refuerzo mediante pegado externo de laminados

En el refuerzo mediante el pegado externo de laminados de FRP, el refuerzo externo es directamente adherido sobre la superficie del elemento a reforzar bajo diferentes configuraciones en función de la tipología de refuerzo considerada en cada caso. Este tipo de refuerzo se puede a su vez subdividir en función del proceso de conformación del refuerzo externo de FRP seleccionado, distinguiéndose de esta manera dos modalidades de refuerzo en base al tipo de laminado aplicado: refuerzo mediante laminados prefabricados y refuerzo mediante laminados de fabricación in situ a partir de tejidos de fibra.

2.3.1.1. Laminados prefabricados

Los laminados prefabricados de FRP se producen mediante un proceso automatizado de pultrusión en el que las fibras que conforman el material compuesto se embeben en una matriz polimérica de características preestablecidas de forma que se genere un laminado unidireccional de FRP de dimensiones perfectamente calibradas y propiedades mecánicas uniformes. Como consecuencia de la automatización del proceso, los laminados prefabricados presentan en general mejores propiedades resistentes que los laminados de fabricación in situ equivalentes. Este tipo de refuerzo es apropiado para el refuerzo de elementos estructurales lineales o planos tales como

vigas, muros o losas. En la figura 2.5 se representa la morfología típica de este tipo de refuerzo y un ejemplo de aplicación característico.

(a) Laminado prefabricado de FRP. (b) Instalación de un laminado prefabricado de FRP.

Figura 2.5 Sistema de refuerzo mediante laminados prefabricados de FRP.

El proceso de refuerzo mediante laminados prefabricados comienza con el saneado y limpieza de la superficie y aplicación sobre ésta de un adhesivo base o imprimación con objeto de mejorar el comportamiento adherente del adhesivo de unión.

Una vez preparada la superficie de hormigón y aplicada la capa de imprimación, se aplica una capa de adhesivo sobre el laminado, y en algunos casos también sobre la superficie del soporte, y se procede a la instalación del laminado aplicando una ligera presión sobre el mismo con objeto de eliminar las posibles burbujas de aire y lograr una distribución uniforme del adhesivo. A partir de ese momento solo queda dejar endurecer la unión.

2.3.1.2. Laminados de fabricación in situ

Los laminados de fabricación in situ se conforman a partir de tejidos de fibra y resina polimérica aplicados ambos alternativamente por capas directamente sobre la superficie del elemento a reforzar. En esta clase de refuerzo, la dirección de las fibras suele ser unidireccional aunque laminados multidireccionales pueden ser también confeccionados.

Este tipo de refuerzo es más sensible a las irregularidades en la superficie de adhesión y suele necesitar un pretratamiento de ésta más exhaustivo. Sin embargo, este tipo de refuerzo es muy flexible en cuanto a su aplicación y permite adaptar su uso a la mayoría de elementos estructurales objeto de refuerzo. Las bandas de tejido suelen tener un ancho entre 200 y 400 mm y un peso entre 200 y 400 g/m². En la Figura 2.6 se representan algunas aplicaciones de este tipo de refuerzo.

(a) Confinamiento de pilares.

(b) Refuerzo a cortante.

Figura 2.6 Sistemas de refuerzo de fabricación in situ a partir de tejidos de fibra.

La instalación de laminados a partir de tejidos de fibra comienza nuevamente con la preparación de la superficie del hormigón. En el caso en el que la superficie no estuviera adecuadamente nivelada, es conveniente la aplicación de algún tipo de pasta niveladora que corrija esta irregularidad. Se aplica a continuación una capa de imprimación, para mejorar la adherencia con el adhesivo, y a continuación se aplica una fina capa de adhesivo de baja viscosidad, típicamente de tipo epoxi. En el siguiente paso se instala el tejido de fibra, extendiéndolo con ayuda de un rodillo, y una vez colocado se aplica una nueva capa de adhesivo. Este proceso puede ser repetido hasta no más de 10 o 15 capas dependiendo del tipo de refuerzo.

2.3.2. Inserción del refuerzo en el recubrimiento (NSM)

Como alternativa, en general, al pegado externo del refuerzo de FRP en forma de laminado, el refuerzo externo, en forma de barra de FRP de reducida sección, puede insertarse en el recubrimiento del elemento a reforzar a través de ranuras mecanizadas en su superficie (Figura 2.7). Esta tipología de refuerzo tiene ventajas en aquellas intervenciones en que la longitud de adherencia posible sea crítica o en las que sea necesario proteger el refuerzo aplicado frente acciones exteriores accidentales de distinta índole, como por ejemplo, frente a impacto, o cuando la superficie a reforzar es especialmente irregular.

Las barras de FRP empleadas en este tipo de refuerzo son en general de sección circular o rectangular y pueden presentar diversos tratamientos superficiales con objeto de mejorar el comportamiento adherente de la unión. En general, el refuerzo mediante NSM incluye los siguientes pasos:

- Mecanizado de las ranuras en la superficie exterior del elemento a reforzar.
- Limpieza de la superficie interior de las ranuras mediante aire comprimido.

- Llenado parcial de la ranura con adhesivo.
- Limpieza de la superficie exterior del FRP y posicionamiento del mismo dentro de la ranura. A continuación, se presiona ligeramente el FRP contra el adhesivo para que éste fluya alrededor de la superficie del FRP y se rellene tanto como sea posible el espacio existente entre el FRP y la ranura.
- Finalmente se rellena completamente la ranura con adhesivo y se elimina el adhesivo sobrante.

(a) Mecanizado de las ranuras.

(b) Instalación del refuerzo.

Figura 2.7 Sistema de refuerzo mediante NSM FRP.

Respecto al pegado externo de laminados, el NSM FRP presenta una serie de ventajas gracias a las cuales ha aumentado considerablemente el interés hacia esta modalidad de refuerzo (De Lorenzis and Teng, 2007). Entre sus principales ventajas cabe destacar:

- La preparación de la superficie puede resultar menos exhaustiva ya que no se necesita la estricta planeidad de la misma, el redondeo de aristas o la eliminación de la capa superficial de hormigón sobre la que se adhiere el FRP (requisitos propios del pegado externo), únicamente se requiere la realización de las ranuras.
- El refuerzo mediante NSM FRP es menos propenso al despegue debido a que el FRP se encuentra rodeado de adhesivo, con el consiguiente aumento de la superficie adherida y mejora de la adherencia.
- Las barras de FRP comúnmente utilizadas en el refuerzo mediante NSM pueden ser más fácilmente ancladas en elementos adyacentes para prevenir el despegue. Esta característica es atractiva en el refuerzo a flexión de vigas o

losas en uniones rígidas, en donde en general el máximo momento se produce al final del elemento.

- Las barras de FRP puede ser pretensadas con mayor facilidad.
- El FRP al estar insertado en el recubrimiento de hormigón se encuentra menos expuesto al daño mecánico externo: impacto, fuego o vandalismo. Esta peculiaridad es especialmente beneficiosa en el refuerzo de vigas o losas en momentos negativos.
- El aspecto externo del elemento reforzado es virtualmente inalterado.

Debido a estas ventajas, el refuerzo mediante NSM es en muchos casos preferible al pegado externo de laminados de FRP, o en su defecto puede ser usado en combinación con éste. El único requisito es que exista un recubrimiento de hormigón suficiente que permita la instalación del refuerzo.

2.3.3. Adhesivos estructurales en el refuerzo con FRP

La unión de elementos mediante adhesivos estructurales permite la transferencia de tensiones desde un miembro de la unión al otro de manera mucho más uniforme que respecto a la obtenida mediante una unión de tipo mecánico equivalente.

Los adhesivos usados comúnmente en ingeniería son de naturaleza muy variada debido a factores tales como el tipo de materiales a unir, la superficie disponible, propiedades mecánicas de la unión, resistencia química requerida, etc. Por todo ello, los adhesivos pueden ser clasificados de múltiples maneras en función del tipo de unión a realizar o las características intrínsecas del propio adhesivo de unión empleado.

En el refuerzo de estructuras con materiales compuestos, los adhesivos estructurales a base de resinas epoxis son los más ampliamente utilizados debido a las excelentes propiedades que presenta en general este tipo de adhesivos (Tabla 2.9). Entre sus principales características cabe destacar su gran poder de adherencia sobre una amplia variedad de materiales, puede emplearse como material de relleno, presenta buenas propiedades mecánicas y elásticas, poca contracción durante el curado, capacidad para trabajar desde muy bajas temperaturas hasta 200 °C, buena resistencia química incluso frente a ácidos no concentrados y estabilidad frente al envejecimiento.

Los adhesivos epoxi puede ser a su vez de baja viscosidad, útil en el refuerzo de momentos negativos donde el adhesivo puede ser vertido directamente sobre la superficie, o de alta viscosidad, para aquellos casos en los que existe riesgo de fluencia o descuelgue del adhesivo.

PROPIEDAD (A 20 °C)	ADHESIVO EPOXI CURADO	HORMIGÓN	ACERO
Densidad [Kg/m ³]	1100 - 1700	2350	7800
Módulo elástico [GPa]	0,5 - 20	20 - 50	205
Módulo tangencial [GPa]	0,2 - 8	8 - 21	80
Coeficiente de Poisson	0,3 - 0,4	0,2	0,3
Resistencia a Tracción [MPa]	9 - 30	1 - 4	200 - 600
Resistencia a Cortante [MPa]	10 - 30	2 - 5	200 - 600
Resistencia a Compresión [MPa]	55 - 110	25 - 150	200 - 600
Deformación de Tracción en rotura [%]	0,5 - 5	0,015	25
Energía de Fractura (aprox.) [Jm ⁻²]	200 - 1000	100	10 ⁵ - 10 ⁶
Coef. de expansión Térmica [10 ⁻⁶ /°C]	25 - 100	11 - 13	10 - 15
Absorción de agua: 7 días - 25°C [% w/w]	0,1 - 3	5	0
Temperatura de transición Vítrea [°C]	45 - 80	-	-

Tabla 2.9 Propiedades más comunes de los adhesivos epoxi, hormigón y acero (Täljsten, 2002).

El uso de adhesivos de naturaleza inorgánica (morteros) como elemento de unión en el refuerzo de estructuras con FRP ha sido también estudiado con objeto de reducir costes, minimizar el impacto medioambiental, conseguir el pegado sobre superficies húmedas o conseguir una mayor resistencia frente a altas temperaturas. Sin embargo, debido en general a sus inferiores propiedades mecánicas, durabilidad o comportamiento adherente su uso es aún limitado.

2.4. Ventajas e inconvenientes de los sistemas de refuerzo con FRP

Existen diferentes soluciones técnicamente viables a la hora de abordar el refuerzo de un determinado elemento estructural de hormigón armado, algunas de las cuales no requieren necesariamente el uso de materiales compuestos. Sin embargo, el empleo de materiales compuestos de tipo FRP presenta una serie de ventajas (Täljsten, 2002):

- Manejo y transporte: Los materiales compuestos utilizados en el refuerzo de estructuras de hormigón armado son muy ligeros y manejables. A diferencia de otros materiales también empleados en el refuerzo externo

como el acero, los materiales compuestos de tipo FRP no necesitan de medios auxiliares importantes para su manejo, transporte e instalación.

- Durabilidad y mantenimiento: En condiciones normales, los materiales compuestos no requieren de ningún tipo de mantenimiento y presentan buenas condiciones de durabilidad.
- Dimensiones: Los materiales compuestos utilizados como refuerzo estructural suelen ser laminados de pequeño espesor o barras de reducido tamaño cuya instalación no altera significativamente la apariencia y dimensiones exteriores del elemento reforzado. Además, pueden combinarse con otros materiales o revestimientos exteriores con el objeto de mejorar la apariencia externa del conjunto o la protección del refuerzo aplicado.
- Rápida instalación y puesta en servicio: En general, gracias al empleo de medios auxiliares ligeros y al relativamente rápido endurecimiento de los adhesivos típicamente empleados, la instalación del refuerzo y uso de la estructura puede realizarse en un corto espacio de tiempo.
- Posibilidad de pretensado: Al igual que otros métodos de refuerzo más convencionales, el refuerzo con FRP puede ser pretensado previo paso a su instalación en el elemento a reforzar. Esta opción permite cerrar parcialmente posibles fisuras existentes y aumentar la capacidad de carga del elemento.
- Diseño: La posibilidad de optimizar el material compuesto en cuanto a la disposición de sus fibras o los materiales constituyentes supone un beneficio añadido para el diseño del refuerzo.
- Coste: Si se analizan todos los costes involucrados en el refuerzo de un determinado elemento a lo largo de la vida útil del mismo, el empleo de materiales compuestos puede suponer un notable ahorro respecto a otras alternativas de refuerzo.

Como contrapartida, existen potenciales desventajas como consecuencia del uso de materiales compuestos de tipo FRP como material de refuerzo en elementos de hormigón armado entre las que cabe destacar las siguientes:

- Deterioro del refuerzo: Los materiales compuestos de tipo FRP son materiales fáciles de cortar o perforar por lo que pueden sufrir desperfectos a causa del vandalismo ocasional o impactos de diversa índole. Si este tipo de riesgos fuesen notables, se deberían instalar medios auxiliares de protección.

- Propiedades a largo plazo: A pesar que determinados materiales compuestos presentan, en general, un buen comportamiento a largo plazo, dada la relativa juventud de esta técnica de refuerzo no se disponen aún de suficientes datos en este sentido como sucede con otras técnicas y materiales, sin embargo, quizás el elemento más vulnerable al paso del tiempo no es el FRP en sí mismo sino el adhesivo de unión. Si se examinan experiencias pasadas con refuerzos similares pero empleando láminas de acero se observa que en éstas el adhesivo no ha experimentado ningún tipo de degradación. Es de esperar, por tanto, que en el caso de materiales compuestos las propiedades del refuerzo se mantengan durante un largo periodo de tiempo.
- Dependencia de la temperatura y la humedad: El proceso de curado de las resinas termoestables es dependiente de la temperatura y la humedad existentes. Puede ser necesario, en función de las condiciones particulares de cada caso, el empleo de medios auxiliares que aporten las condiciones de curado apropiadas en el momento de instalación del refuerzo.
- Falta de experiencia: La falta de experiencia en el cálculo y aplicación en relación a otras técnicas más tradicionales junto con la aparente simplicidad del sistema de refuerzo puede llevar a un uso inadecuado del mismo.
- Conservadurismo: La actitud conservadora que presenta en general el sector de la construcción hacia las nuevas técnicas o materiales es una dificultad añadida que hay que superar.
- Coste: A pesar de que el empleo de materiales compuestos puede suponer, respecto a otros materiales y técnicas, un ahorro económico en determinadas tareas ligadas al refuerzo de un determinado elemento estructural, el precio inicial del material por unidad de área o por unidad de peso es muy superior al de otros materiales habituales en la construcción. En algunos contextos, este hecho puede motivar la elección de otras técnicas de refuerzo más convencionales.

CAPÍTULO 3

REFUERZO A CORTANTE DE VIGAS MEDIANTE NSM FRP Y COMPORTAMIENTO ADHERENTE

3.1. Introducción

La resistencia al esfuerzo cortante en vigas de hormigón armado es un fenómeno complejo hasta ahora no resuelto de manera plenamente satisfactoria y, por tanto, todavía un activo campo de investigación. Las fórmulas que se proponen en las diferentes guías de cálculo existentes son relativamente complejas y en ocasiones contradictorias, lo que puede dar origen a errores de cálculo. Por otra parte, la rotura por esfuerzo cortante es un proceso de naturaleza frágil, es decir, sin que suelen aparecer señales evidentes previas que sirvan de aviso, por lo que pueden ser origen de importantes daños.

Por estas razones, el refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado es una técnica ampliamente usada desde hace mucho tiempo. La solución tradicional ha sido el pegado de chapas de acero en el alma de las vigas, usualmente pegadas mediante una resina de tipo epoxi. Esta solución tiene múltiples inconvenientes como ya se ha indicado, por lo que la solución aportada por los nuevos materiales compuestos, FRP, que solucionaban buena parte de ellos fue desde el inicio ampliamente utilizada. Inicialmente como laminados prefabricados o de conformación in situ a partir de tejidos adheridos a la superficie del alma de las vigas y, desde su aparición, con la nueva técnica del NSM.

Evidentemente, esta técnica no soluciona todos los problemas: en primer lugar, la complejidad de la resistencia a cortante aumenta al considerar un nuevo integrante

entre los elementos resistentes, por lo que las formulaciones de cálculo son más complejas y con nuevas incertidumbres por la falta de una base analítica o experimental suficientemente desarrollada, dado su reciente desarrollo.

Uno de los aspectos fundamentales para el cálculo de la resistencia de un elemento reforzado a cortante con FRP es saber qué grado de adherencia se puede desarrollar entre este elemento y la base del hormigón que sea capaz de desarrollar unas fuerzas de adherencia del orden de las capacidades de este material. En general esto no es así, los elementos a reforzar suelen tener una longitud muy limitada y el fallo de estos elementos es, casi siempre por despegue.

Una de las ventajas del NSM frente al pegado externo es la mayor adherencia que es posible desarrollar, pero, aun así, también en este caso, la mayor parte de las roturas se produce por falta de adherencia. Esta adherencia depende de múltiples factores y es difícil desarrollar una formulación general dada la enorme variedad de elementos de FRP, tipos de resina, condiciones de las ranuras y calidades de los hormigones. Por eso, en esta tesis se ha llevado a cabo un programa experimental específico para el estudio de la adherencia utilizando los mismos elementos (material FRP, resinas, ranuras y hormigones) que en el programa experimental objetivo fundamental de esta tesis: la resistencia a cortante de vigas reforzadas a cortadura con NSM FRP.

Dada la importancia del comportamiento adherente en el comportamiento de las vigas reforzadas a cortante, se presenta en el siguiente apartado un resumen de los trabajos publicados hasta la fecha sobre adherencia. Finalmente, en el apartado 3.3 se presenta el estado del conocimiento sobre el refuerzo a cortante con NSM FRP.

3.2. Comportamiento adherente del NSM FRP y el hormigón

En un elemento resistente constituido por dos o más materiales, la acción conjunta de la sección compuesta resultante de la unión depende básicamente de la adecuada transferencia de tensiones entre ellos. En el caso particular de elementos de hormigón armado, la acción conjunta de la sección depende de la adherencia entre la armadura interna (de acero, o más recientemente también de FRP) y el correspondiente hormigón adyacente. El problema de la adherencia entre hormigón y armadura ha sido ampliamente estudiado desde hace más de un siglo y a día de hoy se continúa trabajando para caracterizar completamente los distintos mecanismos de interacción entre los diferentes materiales. Fruto de este intenso trabajo de investigación se han desarrollado distintos modelos de comportamiento y métodos de ensayos globalmente reconocidos para la correcta caracterización de la adherencia entre el hormigón y su armadura de refuerzo (Eligehausen et al., 1983, Larralde and Silva-Rodriguez, 1993, Malvar, 1995, Cosenza et al., 1997, Focacci et al., 2000, FIB, 2000).

En el refuerzo externo de elementos estructurales de hormigón armado (u otros materiales) mediante materiales compuestos, el comportamiento adherente de la unión adhesiva juega nuevamente un papel fundamental independientemente de la modalidad de refuerzo utilizada (pegado externo de laminados o inserción de barras de NSM FRP). De la adherencia depende la transferencia de tensiones entre el elemento reforzado y el propio refuerzo en orden de soportar conjuntamente las condiciones de carga o desplazamiento impuestas en cada caso.

Para el refuerzo mediante NSM FRP, el elemento de refuerzo queda totalmente envuelto por el adhesivo y más protegido de posibles daños externos, por lo que el comportamiento de la unión adhesiva es generalmente mejor que en el pegado externo de laminados. A pesar de ello, la pérdida de adherencia constituye una de las principales causas de fallo en este tipo de refuerzos, lo que limita por tanto la capacidad de refuerzo máxima potencialmente disponible.

En el refuerzo con NSM FRP, el comportamiento adherente depende de factores tales como la geometría, dimensiones y tipo de recubrimiento de la barra o lámina utilizada, las dimensiones de la ranura, su disposición y las condiciones de ejecución de ésta, o las propiedades mecánicas de los diferentes materiales involucrados (hormigón, adhesivo y FRP). Este gran número de parámetros obliga a un intenso trabajo de laboratorio así como de modelización analítica y numérica que permita caracterizar el comportamiento adherente en esta clase de refuerzos.

El estudio experimental del comportamiento adherente entre el hormigón y el NSM FRP ha sido abordado generalmente mediante la adaptación de los métodos de ensayo utilizados para el estudio de la adherencia de barras de acero en armaduras pasivas en elementos hormigón armado. Dos procedimientos de ensayo han sido comúnmente empleados (FIB, 2000): ensayo de arrancamiento directo o *pull-out test* (sencillo y doble) y ensayo de la viga o *beam test* (Figura 3.1). Variantes de estos dos tipos de ensayo han sido también los principalmente empleados en el estudio de la adherencia mediante NSM FRP adaptados a las particularidades de este refuerzo.

Figura 3.1 Tipos de ensayo en el estudio del comportamiento adherente (FIB, 2000).

El método de arrancamiento (*pull-out test*) consiste esencialmente en tirar de la barra de la que se quiere estudiar la adherencia, estando embebida ésta una longitud determinada en un bloque de hormigón anclado (ver Figura 3.1). Durante el ensayo se controla la fuerza de tracción aplicada sobre la barra y el desplazamiento relativo que se produce entre la barra y el bloque de hormigón. La tensión de adherencia se obtiene dividiendo la fuerza aplicada por el área lateral de la barra en contacto con el hormigón.

Este es un ensayo relativamente sencillo, y por ello es ampliamente usado, pero que tiene el inconveniente de que las condiciones de la barra de la que se estudia la adherencia no son las normales de trabajo, ya que la presión necesaria para mantener el bloque de hormigón en posición genera una presión transversal sobre la barra que actúa en forma de confinamiento aumentando su adherencia. Es un ensayo útil cuando lo que se quiere obtener es una comparación entre distintos elementos similares (barras o adhesivos).

El método de ensayo de la viga (*beam test*) consiste esencialmente en ensayar a flexión una viga de hormigón armado formada por dos bloques independientes unidos para el ensayo por una rótula en la zona superior, que une los cordones a compresión en los bloques, y en la zona de tracción por la barra de la que se quiere estudiar la adherencia. Esta barra está unida a los bloques de hormigón en una longitud determinada fijada por las condiciones de ensayo normalizadas impidiendo la adherencia del resto de la barra mediante manguitos de plástico.

En los extremos de la barra se utilizan captadores de desplazamiento para medir el desplazamiento relativo entre el extremo de cada bloque y los extremos sobresalientes de la barra. La disposición del ensayo hace que toda la longitud de la barra adherida se encuentre en zona de momento constante y, por tanto, fuerza de tracción constante. La fuerza de tracción se obtiene directamente de la carga aplicada y de las dimensiones de la viga y colocación de la barra. La tensión de adherencia se obtiene, igualmente, dividiendo esta fuerza por el área lateral adherida. Las condiciones en que trabaja la barra son similares a las que se encuentra en situación de trabajo normal y los valores obtenidos pueden utilizarse para la determinación de los parámetros que se necesitan en los modelos de adherencia para cada caso determinado. Es un ensayo más complicado que el de arrancamiento y esa es la causa de la limitación de su uso.

En los trabajos que se presentan en esta tesis doctoral se ha utilizado este método del *beam test* para estudiar la adherencia de las barras y láminas de CFRP para poder introducir los valores obtenidos de forma más coherente en los modelos de resistencia a cortante del NSM FRP, objetivo final de la misma.

3.2.1. Mecanismos de fallo en ensayos de adherencia de NSM FRP

Antes de pasar a resumir los principales estudios experimentales realizados hasta la fecha sobre el comportamiento adherente entre el NSM FRP y el hormigón, se indican en la Figura 3.2 los principales modos de fallos observados en ensayos de adherencia con NSM FRP (De Lorenzis and Teng, 2007): fallo adherente en la interfase barra-adhesivo, fallo adherente en la interfase adhesivo-hormigón, rotura del recubrimiento adhesivo con o sin el hormigón adyacente y fallo por desprendimiento del hormigón.

El fallo adherente en la interfase barra-adhesivo puede producirse puramente en la interfase (BE-I, en la nomenclatura) o en el propio adhesivo por fallo de éste (BE-C). El fallo adherente en la interfase adhesivo-hormigón puede producirse nuevamente puramente en la interfase (EC-I) o puede ser un fallo cohesivo en el hormigón (EC-C). La rotura del recubrimiento adhesivo puede producirse sin la rotura del hormigón adyacente (SP-E) o puede venir acompañada de la rotura de éste (SP-C1 y SP-C2). Finalmente, si el FRP se encuentra cerca de uno de los bordes del elemento reforzado puede producirse el desprendimiento del hormigón junto a la arista (SP-ED).

Figura 3.2 Modos de fallo en ensayos de adherencia (De Lorenzis and Teng, 2007).

3.2.2. Estudios experimentales sobre el comportamiento adherente entre el NSM FRP y el hormigón

A continuación se incluye una revisión de los principales estudios realizados para caracterizar el comportamiento adherente del NSM FRP, indicándose, en cada caso, las características más significativas de los mismos como la tipología de ensayo empleada, el tipo de FRP considerado, las variables de estudio principales, así como los mecanismos o modos de fallo documentados en cada uno de ellos.

Yan et al. (Yan et al., 1999) estudiaron el comportamiento adherente de barras de NSM CFRP a través de un ensayo de tipo *pull-out* doble (Figura 3.3). Las barras de CFRP empleadas en el estudio tenían una sección circular de 11 mm de diámetro y estaban recubiertas superficialmente con arena con objeto de mejorar la adherencia. La unión entre el FRP y el hormigón se realizó mediante un adhesivo de tipo epoxi. Se realizaron un total de siete ensayos y se consideraron tres longitudes de adherencia (51, 102 y 152 mm). Los modos de fallo observados fueron el deslizamiento de la barra en la interfase FRP-adhesivo y la rotura del hormigón próximo al borde del elemento de ensayo.

Figura 3.3 Ensayo de *pull-out* doble (Yan et al., 1999).

De Lorenzis y Nanni (De Lorenzis and Nanni, 2002) estudiaron el comportamiento adherente de barras de NSM FRP mediante un ensayo de tipo viga con una sección transversal de la misma en forma de "T" invertida (Figura 3.4). El conjunto de la viga de ensayo incluía una rótula metálica en su parte superior y un corte transversal en la zona inferior, ambos situados en el centro de la luz de la viga. El objetivo de la rótula era centrar las compresiones de la parte superior de la viga y el del corte en la cara inferior era inducir la formación de una fisura en ese punto del espécimen. Las variables consideradas en el estudio fueron la longitud de adherencia impuesta (12, 18 y 24 veces el diámetro de la barra), el diámetro de la barra (9,5 y 13 mm), el tipo de FRP (barra de fibra de vidrio y fibra de carbono), el recubrimiento superficial de las

barras de CFRP (corrugada o con recubrimiento de arena) y las dimensiones de la ranura. Entre los resultados obtenidos se comprobó un aumento en la carga de arrancamiento con el incremento de la longitud adherida y un mejor comportamiento de las barras corrugadas respecto a las barras con recubrimiento de arena. Los modos de fallo observados fueron: rotura del recubrimiento adhesivo, rotura del hormigón adyacente a la unión y deslizamiento de la barra de FRP.

Figura 3.4 Ensayo tipo viga con sección en “T” invertida (De Lorenzis and Nanni, 2002).

De Lorenzis et al. (De Lorenzis et al., 2002) estudiaron el comportamiento adherente de barras de NSM FRP mediante la adaptación de un ensayo de tipo *pull-out*. La principal modificación realizada en la tipología de ensayo utilizada fue la adaptación de una nueva morfología en la probeta de hormigón consistente en un bloque de hormigón en forma de “C” (Figura 3.5). Las variables consideradas en el estudio fueron el tipo de adhesivo empleado (mortero de cemento o adhesivo epoxi), la longitud de adherencia considerada (4, 12 y 24 veces el diámetro de la barra de FRP), dimensiones de la ranura realizada y el tipo de FRP (barra corrugada de GFRP o CFRP y barra de CFRP con recubrimiento de arena en espiral). El modo de fallo observado para el adhesivo epoxi y los dos tipos de barra de CFRP fue por deslizamiento en la interfase adhesivo-hormigón. Este modo de fallo fue debido según los autores a que las ranuras fueron premoldeadas en una primera fase de los ensayos. Para las barras de GFRP y adhesivo epoxi los modos de fallo fueron desde la rotura del recubriendo adhesivo, acompañado del hormigón adyacente, hasta el fallo en la interfase adhesivo-hormigón. En el caso del mortero de cemento la rotura del recubrimiento adhesivo fue el modo de fallo predominante.

Blaschko (Blaschko, 2003) llevó a cabo una serie de ensayos de tipo *pull-out* para el estudio del comportamiento adherente de láminas de NSM CFRP en hormigón. Las variables principales en el estudio fueron la longitud adherida, la resistencia del hormigón y la distancia de la ranura al borde del elemento reforzado. Los modos de

fallo observados fueron el deslizamiento de la lámina en la interfase FRP–adhesivo y la rotura del hormigón próximo al borde del elemento.

Figura 3.5 Ensayo de pull-out con bloque en forma de “C” (De Lorenzis et al., 2002).

Sena-Cruz y Barros (Sena-Cruz and Barros, 2002, 2004) estudiaron el comportamiento adherente de láminas de NSM CFRP mediante un ensayo de adherencia de tipo viga (Figura 3.6). Las variables analizadas en el estudio fueron la longitud adherida (40, 60 y 80 mm) junto con la resistencia del hormigón (35, 45, y 70 MPa). El hormigón empleado en el estudio fue un hormigón reforzado con fibras para evitar el fallo prematuro del mismo. En todos los casos el fallo se produjo por deslizamiento en la interfase FRP-adhesivo o adhesivo-hormigón.

Figura 3.6 Ensayo tipo viga adoptado por Sena-Cruz y Barros (Sena-Cruz and Barros, 2002, 2004).

Sena-Cruz et al. (Sena-Cruz et al., 2006) realizaron un nuevo estudio de adherencia de láminas de NSM CFRP bajo la misma tipología de ensayo empleada en campañas experimentales previas (Sena-Cruz and Barros, 2002, 2004). En este caso las

longitudes de adherencia analizadas fueron 60, 90 y 120 mm, obteniéndose modos de fallo similares a los anteriormente indicados.

Shield et al. (Shield et al., 2005) analizaron el comportamiento adherente de láminas de NSM CFRP a través de la adaptación de un ensayo de tipo *pull-out*. El principal objetivo del estudio fue el análisis de la influencia del tipo de adhesivo en el comportamiento adherente de la unión FRP-hormigón, para ello se consideraron siete tipos de adhesivo epoxi. En cuanto a los modos de fallo observados, de los siete tipos de adhesivo considerados, en cinco de ellos el fallo se produjo por deslizamiento en la interfase FRP-epoxi, en uno de ellos por deslizamiento en la interfase epoxi-hormigón y en otro de ellos de diferentes maneras, incluyendo el fallo por despegue en la interfase FRP-adhesivo, fallo cohesivo en el adhesivo, fallo cohesivo en el hormigón y rotura del FRP.

Thorenfeldt (Thorenfeldt, 2007) analizó la adherencia de láminas de CFRP mediante un ensayo de tipo *pull-out*. Las variables analizadas en el estudio fueron el tamaño de la lámina de CFRP (3 x 15 y 2,5 x 20 mm²), la longitud adherida (100 y 300 mm) y dos tipos de adhesivo epoxi. En cuanto a los resultados obtenidos, no se apreciaron diferencias entre los dos tipos de adhesivo epoxi empleados y se obtuvieron resultados similares de tensión de adherencia para ambas láminas. Los modos de fallo no fueron indicados.

Novidis et al. (Novidis et al., 2007) realizaron un estudio experimental de adherencia de barras de NSM CFRP con recubrimiento de arena a través de un ensayo de tipo *pull-out*. La principal modificación realizada respecto a un ensayo convencional de este tipo fue la inclusión en las proximidades de la unión adhesiva de un corte en el bloque de hormigón con objeto de evitar las tensiones de compresión que pueden generarse en la zona de unión en este tipo de ensayos. Como variables de estudio se consideraron la longitud adherida y las dimensiones de la ranura. Se realizaron un total de 24 ensayos en los que el fallo se produjo por deslizamiento en la interfase barra-adhesivo y adhesivo-hormigón.

Seracino et al. (Seracino et al., 2007a) estudiaron el comportamiento adherente de láminas de NSM CFRP mediante la adaptación de un ensayo de tipo *pull-out* (Figura 3.7). Se realizaron un total de 34 ensayos en los que se analizaron la longitud de adherencia impuesta (100, 150, 200, 250, 300 y 350 mm), el espesor de la lámina de CFRP (1,2 y 2,4 mm) y el ancho de la misma (10, 15 y 20 mm). La resistencia del hormigón empleado en el estudio varió entre 30 y 65 MPa. Tres modos de fallo fueron observados: fallo cohesivo en el hormigón, fallo cohesivo en el adhesivo y rotura del FRP. El fallo cohesivo del hormigón fue el principal modo de fallo.

Figura 3.7 Ensayo de pull-out adoptado por Seracino et al. (Seracino et al., 2007a).

Seracino et al. (Seracino et al., 2007b) llevaron a cabo otra serie de 14 ensayos bajo la misma tipología de ensayo que la seguida anteriormente en (Seracino et al., 2007a). La longitud de adherencia considerada en este estudio fue en todos los casos de 300 mm. Las variables analizadas fueron el espesor de la lámina de CFRP comprendida entre 3 y 100 mm, junto con el ancho de la lámina, comprendido entre 12 y 30 mm. La resistencia del hormigón fue en este caso 36,7 MPa. En cuanto al modo de fallo observado fue en todos los casos un fallo cohesivo en el hormigón.

Oehlers et al. (Oehlers et al., 2008) estudiaron la influencia sobre la adherencia del espesor de recubrimiento adhesivo en el refuerzo mediante NSM FRP. Para ello realizaron un total de 20 ensayos de tipo *pull-out* empleando como material de ensayo láminas de CFRP. El espesor del recubrimiento de adhesivo considerado estaba comprendido entre 0 y 55 mm. En base a los resultados obtenidos, el modo de fallo observado variaba en función del recubrimiento adhesivo. A medida que éste se incrementaba, el fallo cambiaba desde fallo cohesivo en el hormigón a fallo cohesivo en el adhesivo hasta la rotura por “*splitting*” del hormigón.

Rashid et al. (Rashid et al., 2008) llevaron a cabo un estudio experimental sobre la adherencia de láminas de NSM CFRP mediante la adaptación de un ensayo de tipo *pull-out*. El principal objetivo del estudio fue el análisis de la interacción existente entre láminas de refuerzo adyacentes junto con el estudio del comportamiento del NSM FRP cuando éste se instala en las proximidades del borde del elemento reforzado. Para el estudio del espaciado entre ranuras de refuerzo se consideraron dos láminas de NSM CFRP separadas 30, 40, 50 o 70 mm. Para el estudio de la influencia de la distancia del refuerzo de NSM FRP respecto al borde del elemento reforzado se consideraron dos casos. En el primer caso se empleó una lámina de $1,2 \times 20 \text{ mm}^2$ y 7 distancias al borde del elemento ensayado: 10, 20, 30, 40, 60, 85 y 150 mm. En el segundo caso se empleó una lámina de $2,4 \times 40 \text{ mm}^2$ y 4 distancias al borde del elemento ensayado: 50, 75, 100 y 150 mm. A partir de los resultados obtenidos concluían que para un espaciado entre ranuras de refuerzo de 2,5 veces la altura de la lámina, y para una distancia al borde del elemento reforzado de 3,5 veces la altura de la lámina de refuerzo, la influencia de estos parámetros sobre el comportamiento adherente puede ser despreciable.

Galati y De Lorenzis (Galati and De Lorenzis, 2009) estudiaron la influencia sobre el comportamiento adherente en el refuerzo con NSM FRP de la geometría de la ranura, la distancia de ésta al borde del elemento reforzado, las propiedades mecánicas del adhesivo y el efecto del confinamiento de la unión mediante tejido de CFRP. Los resultados obtenidos indicaron que un aumento en el ancho de la ranura (manteniendo una profundidad constante) incrementa la resistencia última de la unión. También observaron que un aumento en el módulo de elasticidad y la resistencia a tracción del adhesivo mejora el comportamiento de la unión.

Perera et al. (Perera et al., 2009) estudiaron el comportamiento adherente de barras de NSM CFRP mediante un ensayo de tipo *pull-out*. El objetivo principal del programa de ensayos fue analizar la influencia de la sección de la barra sobre el comportamiento de la unión adhesiva FRP-hormigón, para ello se realizaron un total de 12 ensayos en los que se consideraron tres tipos de CFRP: barra redonda de 12 mm de diámetro, lámina de 2 mm de espesor y 16 mm de ancho y barra cuadrada de 10 x 10 mm². Para cada sección de CFRP considerada se analizaron cuatro longitudes de adherencia. Varios modos de fallo fueron observados: fallo cohesivo en el hormigón, fallo en la interfase FRP-adhesivo, fallo en la interfase adhesivo-hormigón y fallo cohesivo en el adhesivo. Entre los tres tipos de CFRP considerados, la lámina de CFRP resultó ser la más efectiva en cuanto al aprovechamiento de su capacidad resistente última debido a su mayor relación perímetro-sección transversal.

Bilotta et al. (Bilotta et al., 2011) estudiaron el comportamiento adherente de varios tipos de láminas y barras de NSM FRP a través de la adaptación de un ensayo de corte simple. El objetivo de este estudio fue comparar la eficiencia del refuerzo mediante NSM respecto al pegado externo (EB). Las variables analizadas en el estudio fueron el tipo de material de refuerzo (barras de fibra de vidrio, basalto y carbono), la geometría del FRP (barra redonda, cuadrada y lámina), las dimensiones de la barra o lámina y el tratamiento superficial de las mismas. Los resultados indicaron un mejor aprovechamiento de las propiedades mecánicas del FRP a través del refuerzo mediante NSM.

Soliman et al. (Soliman et al., 2011) estudiaron el comportamiento adherente de barras de NSM FRP mediante un ensayo de tipo *pull-out* similar al empleado anteriormente en (De Lorenzis et al., 2002). Las variables consideradas en el estudio fueron la longitud adherida (6, 12, 18, 24 y 36 veces el diámetro de la barra), el tipo de FRP (barra de fibra de carbono y fibra de vidrio), el diámetro de la barra de FRP (9,5 y 12,7 mm), ancho de la ranura (1,5 y 2 veces el diámetro de la barra), tipo de adhesivo (epoxi o mortero de cemento) y condiciones ambientales (condiciones normales de temperatura y ciclos de hielo/deshielo). Entre los resultados obtenidos, el principal modo de fallo observado con el adhesivo de tipo epoxi fue por rotura del hormigón acompañado o no con fisuración del adhesivo junto con la rotura del FRP para los

casos de mayor longitud adherida. Se observó también una reducción de la resistencia de la unión adhesiva con los ciclos de hielo/deshielo.

Al-Mahmoud et al. (Al-Mahmoud et al., 2011) desarrollaron un programa experimental para estudiar el efecto de la resistencia del hormigón, el tipo de adhesivo, las dimensiones de la ranura y el tratamiento superficial de ésta sobre el comportamiento adherente de barras de NSM CFRP recubiertas superficialmente con arena. El estudio experimental se llevó a cabo a través de un ensayo de tipo *pull-out*. Los resultados de los ensayos indicaron un mejor comportamiento del adhesivo de tipo epoxi empleado respecto al mortero de cemento considerado también en el estudio, obteniéndose para este último caso una carga de despegue de aproximadamente la mitad. Respecto al tratamiento superficial de la ranura, se obtuvo una variación sobre la carga máxima de aproximadamente el 15%. Los resultados también indicaron un ancho de ranura óptimo comprendido entre 1,7 y 2,5 veces el diámetro de la barra de FRP.

Sharaky et al. (Sharaky et al., 2013a) analizaron el efecto de diferentes parámetros constructivos y tipos de FRP sobre el comportamiento adherente entre el NSM FRP y el hormigón. El estudio experimental se llevó a cabo mediante un ensayo de tipo *pull-out* de similares características a las empleadas anteriormente por (De Lorenzis et al., 2002, Soliman et al., 2011). Las principales variables consideradas en el estudio fueron: el tipo de FRP y tratamiento superficial de éste (barra de fibra de carbono y fibra de vidrio), la longitud de adherencia, la geometría de la ranura (dimensiones y formas), el modo de obtención de la ranura (tipo de superficie) y el efecto sobre el comportamiento adherente de fijaciones complementarias en la zona de unión FRP-hormigón. Entre los principales resultados se observaron diferentes modos de fallo en función del tipo de FRP y las variables consideradas en el estudio. Para las barras de CFRP el principal modo de fallo fue por deslizamiento en la interfase FRP-adhesivo. Para las barras de GFRP el fallo se produjo por deslizamiento en la interfase adhesivo-hormigón, rotura del recubrimiento adhesivo y fallo por rotura del hormigón. Se comprobó también un incremento de la carga de deslizamiento con el aumento del tamaño de la ranura. Finalmente, la introducción de fijaciones complementarias en la zona de unión mejoró el comportamiento adherente en un 8,67% aproximadamente.

Sharaky et al. (Sharaky et al., 2013b) realizaron un nuevo estudio experimental bajo la misma tipología de ensayo indicada anteriormente. En este caso se analizó el efecto sobre la adherencia entre el NSM FRP y el hormigón del tipo de adhesivo epoxi, tipo y tamaño del FRP, geometría de la ranura, longitud de adherencia y uso de fijaciones complementarias en la unión. Los modos de fallo observados fueron similares a los indicados anteriormente, aunque, en este caso, se encontraban también influenciados por el tipo de adhesivo considerado. A mayor ductilidad del adhesivo, mejor comportamiento adherente en cuanto a la carga última y ductilidad en el modo fallo. Para una misma longitud adherida y dimensiones de ranura, el tipo de adhesivo puede

incrementar la carga última en un 20% aproximadamente para barras de CFRP y un 32,4%, 36,7% y 46,3% para barras de GFRP sin cambio en el modo de fallo.

Bilotta et al. (Bilotta et al., 2014) completaron un estudio anterior (Bilotta et al., 2011) con nuevos ensayos de adherencia de NSM FRP con barras de fibra de basalto y fibra de carbono de 8 y 10 mm de diámetro y con diferentes tamaños de ranura. Destacan entre los resultados el aumento de resistencia con el aumento del tamaño de la ranura en el caso de barras de fibra de carbono, pero no en el caso de fibra de basalto. Los autores presentan también un estudio estadístico de una base de datos formada por los 36 ensayos realizados por ellos completada con 187 ensayos obtenidos de la literatura.

Bilotta et al. (Bilotta et al., 2015) presentaron los resultados de un “*round robin test*” llevado a cabo por distintos laboratorios sobre el comportamiento adherente del NSM FRP y con objeto de estudiar: el mecanismo de adherencia en ensayos dobles de arrancamiento, la influencia de las diferentes variantes de ensayo, las diferencias entre laboratorios y la influencia de las diferentes resistencias del hormigón. Utilizaron nueve sistemas diferentes de refuerzo con NSM FRP, con un total de 94 ensayos con dobles bloques de hormigón de 400 x 150 x 150 mm³ conectados por dos barras o láminas de FRP. Se evaluaron las diferentes formas del FRP, barras o láminas; el tipo de fibras, carbono, basalto o vidrio y el tipo de tratamiento superficial. Apreciaron que distintos tipos de rotura pueden aparecer progresivamente a lo largo del ensayo pero establecieron como fallos principales: despegue en la interfase FRP-adhesivo, despegue en la interfase adhesivo-hormigón, rotura del recubriendo adhesivo junto con el hormigón adyacente, rotura del FRP y rotura del hormigón a lo largo del plano de la armadura interna.

Coelho et al. (Coelho et al., 2015) recopilaron datos experimentales de la literatura de ensayos de adherencia de NSM FRP, tanto del método *pull-out test* como *beam test*, y compararon éstos con las formulaciones de cálculo propuestas en las guías de diseño con FRP americana y australiana. Entre las principales conclusiones alcanzadas destacan: la ausencia en la bibliografía de un modo de fallo condicionante que describa realmente el modo de fallo producido en los ensayos de adherencia; y el carácter conservador, antes incluso de la aplicación de los respectivos coeficientes de seguridad, de las predicciones teóricas de la carga de *pull-out* en ensayos de adherencia de NSM FRP.

3.2.3. Leyes de comportamiento adherente entre NSM FRP y el hormigón

Basados en la metodología seguida en el estudio del comportamiento adherente de barras de acero en armaduras pasivas, se han llevado a cabo varios estudios para establecer relaciones de tensión de adherencia-deslizamiento de barras de FRP

empleadas como refuerzo interno (Larralde and Silva-Rodriguez, 1993, Malvar, 1995, Cosenza et al., 1997, Focacci et al., 2000). Y en base a éstos, diferentes autores han desarrollado modelos adaptados a las particularidades del NSM FRP.

Una de las herramientas de mayor utilidad para caracterizar el comportamiento adherente entre NSM FRP y el hormigón son las curvas de tensión de adherencia local-deslizamiento obtenidas, en general, a partir de ensayos de adherencia de tipo *pull-out* o *beam test*. En base a estas curvas es posible apreciar los distintos mecanismos resistentes que intervienen en el fenómeno de la adherencia: adhesión química, rozamiento e interacción mecánica.

Para barras de NSM FRP de sección circular De Lorenzis (De Lorenzis, 2004) propuso tres leyes de comportamiento adherente en base al modo de fallo observado y el tipo de fibra empleado. Cuando el fallo se produce por deslizamiento en las interfases FRP-adhesivo, adhesivo-hormigón o por rotura del recubrimiento adhesivo, la ecuación 3.1 parece describir adecuadamente los resultados experimentales con un suave descenso de la tensión de adherencia tras el pico de tensión. La segunda ley de comportamiento fue observada cuando el fallo se produce por rotura del hormigón adyacente a la unión adhesiva (ecuación 3.2). La tercera ley de comportamiento (para barras con recubrimiento de arena) puede ser considerada un caso particular de la segunda en la que la rama descendente desde la máxima tensión de adherencia se produce linealmente (ecuación 3.3).

Tipo I:

$$\begin{aligned}\tau(s) &= \tau_m \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha_1} = C_1 \cdot s^{\alpha_1} & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau(s) &= \tau_m \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha_2} = C_2 \cdot s^{\alpha_2} & s \geq s_m\end{aligned}\quad (3.1)$$

Tipo II:

$$\begin{aligned}\tau(s) &= \tau_m \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha} = C \cdot s^{\alpha} & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau(s) &= \tau_f & s \geq s_m\end{aligned}\quad (3.2)$$

Tipo III:

$$\begin{aligned}\tau(s) &= \tau_m \cdot \left(\frac{s}{s_m}\right)^{\alpha} = C \cdot s^{\alpha} & 0 \leq s \leq s_m \\ \tau(s) &= \tau_m + p \cdot (s - s_m) & s_m \leq s \leq s_f \\ \tau(s) &= \tau_f & s \geq s_f\end{aligned}\quad (3.3)$$

En donde $\tau(s)$ es la tensión de adherencia-deslizamiento local, τ_m es la máxima tensión de adherencia, s_m es el valor de deslizamiento para la tensión de adherencia máxima, C_i y α_i son constantes determinadas mediante ajuste experimental, τ_f es la tensión de adherencia residual y p es la pendiente del segundo tramo lineal en la ley de comportamiento adherente tipo III.

a) Tipo I.

b) Tipo II.

c) Tipo III.

Figura 3.8 Leyes de adherencia (De Lorenzis, 2004).

Para láminas de CFRP, Sena-Cruz y Barros (Sena-Cruz and Barros, 2004) adoptaron el modelo de adherencia dado por la ecuación 3.4, originalmente propuesto por Focacci et al. (Focacci et al., 2000), el cual calibraron con resultados experimentales presentados en (Sena-Cruz and Barros, 2002). Esta ley de comportamiento fue también la adoptada por De Lorenzis et al. (De Lorenzis et al., 2002) para barras redondas de CFRP.

$$\begin{aligned}
\tau(s) &= \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_0}\right)^{\alpha_1} = C_1 \cdot s^{\alpha_1} & s \leq s_0 \\
\tau(s) &= \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_0}\right)^{\alpha_2} = C_2 \cdot s^{\alpha_2} & s \geq s_0
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Donde τ_{max} es la máxima tensión de adherencia local, s_0 es el respectivo valor de deslizamiento para la tensión máxima, y C_i y α_i son constantes determinadas mediante ajuste a través de ensayos experimentales.

Borchert et al. (Borchert et al., 2007) propusieron adoptar la relación tensión de adherencia local-deslizamiento adoptada por el Código Modelo (CEB-FIB, 1993) para barras de acero y compuesta por cuatro tramos (ecuación 3.5).

$$\begin{aligned}
\tau(s) &= \tau_{max} \cdot \left(\frac{s}{s_1}\right)^{\alpha_1} = C_1 \cdot s^{\alpha_1} & s \leq s_1 \\
\tau(s) &= \tau_{max} & s_1 \leq s \leq s_2 \\
\tau(s) &= \tau_{max} - \frac{\tau_{max} - \tau_f}{s_3 - s_2} (s - s_2) = C_2 \cdot s^{\alpha_2} & s_2 \leq s \leq s_3 \\
\tau(s) &= \tau_f & s \geq s_3
\end{aligned} \tag{3.5}$$

Donde nuevamente τ_{max} es la máxima tensión de adherencia local, s_1 y s_2 son los valores de deslizamiento local que delimitan el tramo de tensión máxima, s_3 es el valor inicial de deslizamiento para la tensión residual τ_f y C_i y α_i son constantes determinadas mediante ajuste a través de ensayos experimentales.

Capozucca et al. (Capozucca et al., 2015) realizaron ensayos de adherencia de barras de CFRP mediante *pull-out*. Utilizaron barras de 8 mm de diámetro y resina epoxi en ranuras de 20 x 20 mm² con diferentes longitudes de adherencia: 200, 250 y 300 mm. Midieron las deformaciones en distintos puntos a lo largo de cada barra con objeto de comprobar las leyes tensión adherente-deslizamiento para aplicar al estudio del refuerzo a flexión con NSM FRP. Comprobaron un buen ajuste de los resultados con el Tipo I de las leyes propuestas por De Lorenzis (De Lorenzis, 2004), ecuaciones 3.1.

3.3. Refuerzo frente a esfuerzos de cortadura con NSM FRP

En el caso característico de una viga de hormigón, las barras o láminas de refuerzo de NSM FRP se adhieren en ranuras realizadas en las caras laterales de la viga bajo diferentes configuraciones, constituyendo en su conjunto un sistema de refuerzo eficaz para incrementar la capacidad resistente última del elemento frente a esfuerzos de cortadura. Las investigaciones realizadas hasta la fecha sobre el refuerzo a cortante mediante NSM FRP son muy limitadas si se comparan con otras modalidades de

refuerzo empleadas en la actualidad, y la casi totalidad de las guías de diseño publicadas sobre el refuerzo con materiales compuestos de tipo FRP no contemplan esta particular modalidad de refuerzo. Únicamente la guía británica sobre refuerzo con materiales compuestos contempla expresamente en su última edición el refuerzo a cortante mediante NSM FRP (TR55, 2012).

Los principales motivos de ausencia de normativa o recomendaciones de cálculo para esta modalidad de refuerzo se deben a la ausencia de modelos analíticos fiables junto a la escasez de datos experimentales, por el relativo reciente desarrollo de la técnica NSM FRP, que permitan establecer modelos empíricos con un adecuado nivel de seguridad.

3.3.1. Resistencia a cortante de vigas de hormigón armado

Los mecanismos de resistencia frente a esfuerzos de cortadura en vigas de hormigón armado han sido ampliamente estudiados desde hace más de un siglo a través de numerosos trabajos de investigación tanto de índole experimental como teórico. Fruto de este continuado esfuerzo se han logrado avances en el entendimiento de los diferentes mecanismos involucrados en la resistencia a cortante de vigas de hormigón armado con y sin armadura transversal. Sin embargo, debido básicamente a la complejidad que encierra globalmente el proceso, no existe aún un modelo de comportamiento universalmente aceptado que sea fruto analítico de los posibles mecanismos de resistencia actuantes. Como consecuencia de ello, a día de hoy, se continúan publicando estudios sobre la materia y los modelos de cálculo que proponen todas las guías y normativas finalmente se basan en modelos comprobados empíricamente sin una justificación teórica completa.

Los modelos de cálculo propuestos para la estimación de la resistencia a cortante de vigas de hormigón armado con armadura transversal consideran que la resistencia a cortadura del elemento depende, en general, de la capacidad resistente del hormigón y de la capacidad resistente de la armadura transversal dispuesta. Sin embargo, la manera de cuantificar cada una de estas contribuciones no es completamente homogénea tal y como demuestran las diferentes guías y códigos internacionales publicados sobre la materia, donde en algunos casos, por ejemplo, se desestima la contribución del hormigón en la resistencia. No obstante, la mayoría de normativas sobre hormigón estructural formulan generalmente la resistencia a cortadura de vigas de hormigón armado a través de la siguiente expresión:

$$V = V_c + V_s \quad 3.6$$

donde, V_c es el aporte hecho por el hormigón y V_s es el aporte hecho por la armadura transversal de acero.

La contribución del hormigón a la resistencia a cortadura de vigas de hormigón armado depende de numerosos factores tales como la propia resistencia del hormigón, la cuantía de armadura longitudinal, tamaño del elemento (*size effect*), la posición y tipo de cargas aplicadas o la influencia de los esfuerzos axiales. Se han identificado cinco mecanismos de resistencia básicos responsables de la transferencia de esfuerzos de cortadura en vigas de hormigón armado (sin armadura transversal). Éstos son:

- Tensiones tangenciales en la zona no fisurada (cabeza de la viga comprimida).
- Engranamiento de áridos (*aggregate interlock*).
- Efecto pasador de la armadura longitudinal (*dowel action*).
- Efecto arco.
- Tensiones residuales de tracción en las fisuras.

La importancia que cada mecanismo de resistencia tiene en la resistencia global del elemento a cortante es difícil de cuantificar lo que contribuye a la gran variedad de modelos de cálculo existentes. Algunos de estos modelos están basados en observaciones meramente experimentales y otros en cambio están establecidos en base a fundamentos teóricos de la mecánica tradicional o la mecánica de fractura. En la Figura 3.9 se representan los diferentes mecanismos actuantes en una viga y el aporte aproximado, en porcentaje, de cada uno en la resistencia a cortante según la estimación dada por Taylor en 1974 (Taylor, 1974).

Figura 3.9 Mecanismos básicos que se movilizan para resistir el esfuerzo cortante según (Taylor, 1974).

En cuanto a la contribución de la armadura transversal dispuesta en la resistencia a cortante existen a su vez numerosos métodos de cálculo, desde los que consideran que la resistencia a cortante de la viga depende exclusivamente de los cercos, como

es el caso de la teoría de Ritter y Morsch (Ritter, 1899, Morsch, 1909, 1920), supuesta una resistencia mínima del hormigón a compresión, hasta formulaciones que se basan en modelos basados en las ecuaciones de equilibrio y compatibilidad de deformaciones entre el hormigón y el acero, como es el caso de la Teoría Modificada del Campo de Compresiones (Vecchio and Collins, 1986, Vecchio, 2000).

A continuación, se realiza una breve introducción de los procedimientos de cálculo, de base experimental, propuestos por la normativa española (EHE, 2008), europea (Eurocódigo-2, 2010) y estadounidense (ACI-318R, 2008) para el cálculo de elementos de hormigón armado sometidos a esfuerzos de cortadura.

3.3.1.1. Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)

La normativa española a través de la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE, 2008) define para el cálculo de la resistencia frente a esfuerzos de cortadura un valor de esfuerzo cortante efectivo (V_{rd}) de forma que:

$$V_{rd} = V_d + V_{pd} + V_{cd} \quad 3.7$$

donde:

V_d es el valor de cálculo del esfuerzo cortante producido por las acciones exteriores.

V_{pd} es el valor de cálculo de la componente de la fuerza de pretensado paralela a la sección en estudio.

V_{cd} es el valor de cálculo de la componente paralela a la sección de la resultante de tensiones normales, tanto de compresión como de tracción, sobre las fibras longitudinales de hormigón, en piezas de sección variable.

A partir de dicho esfuerzo cortante efectivo (V_{rd}) se definen las comprobaciones relativas al estado límite de agotamiento por esfuerzo cortante para elementos lineales de hormigón armado. El fallo por esfuerzos de cortadura puede alcanzarse por agotamiento a compresión del alma o por agotamiento a tracción de ésta, en cuyo caso es necesario comprobar que se cumple simultáneamente:

$$V_{rd} \leq V_{u1} \quad 3.8$$

$$V_{rd} \leq V_{u2} \quad 3.9$$

donde:

V_{u1} es el esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua en el alma.

V_{u2} es el esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma.

Esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua del alma (V_{u1})

El esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua del alma (V_{u1}) se deduce de la siguiente expresión:

$$V_{u1} = K f_{1cd} b_0 d \frac{\cot \theta + \cot \alpha}{1 + \cot^2 \theta} \quad (3.10)$$

donde:

f_{1cd} es la resistencia a compresión del hormigón:

$$\begin{aligned} f_{1cd} &= 0,6 f_{cd} && \text{para } f_{ck} \leq 60 \text{ N/mm}^2 \\ f_{1cd} &= (0,9 - f_{ck}/200) f_{cd} \geq 0,5 f_{cd} && \text{para } f_{ck} > 60 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \quad (3.11)$$

f_{cd} es la resistencia de cálculo del hormigón en compresión.

f_{ck} es la resistencia característica del hormigón.

b_0 es la anchura neta mínima del elemento.

K es un coeficiente que depende del esfuerzo axial (para estructuras sin pretensado o sin esfuerzo axial de compresión, $K = 1$).

α es el ángulo de las armaduras con el eje de la pieza.

θ es el ángulo entre las bielas de compresión de hormigón y el eje de la pieza (Figura 3.10). Se adoptará un valor que cumpla:

$$0,5 \leq \cot \theta \leq 2,0 \quad (3.12)$$

Figura 3.10 Ángulo entre las bielas de compresión de hormigón y el eje de la pieza (EHE, 2008).

Esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma (V_{u2})

Para elementos con armadura de cortante, el esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma (V_{u2}) se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su} \quad (3.13)$$

donde:

V_{su} es la contribución de la armadura transversal del alma a la resistencia a esfuerzo cortante:

$$V_{su} = z \sen \alpha (\cot \alpha + \cot \theta) \Sigma A_{\alpha} \frac{f_{y\alpha,k}}{\gamma_s} \quad (3.14)$$

donde:

A_{α} es el área por unidad de longitud de cada grupo de armaduras que forman un ángulo α con la directriz de la pieza.

$f_{y\alpha,k}$ es la resistencia característica de la armadura A_{α} .

γ_s es el coeficiente parcial de seguridad del acero.

z es el brazo mecánico. En flexión simple, y a falta de cálculos más precisos puede adoptarse el valor aproximado $z = 0,9d$.

V_{cu} es la contribución del hormigón a la resistencia a esfuerzo cortante:

$$V_{cu} = \left[\frac{0,15}{\gamma_c} \xi (100 \rho_l f_{cv})^{1/3} + 0,15 \sigma_{cp} \right] \beta b_w d \quad (3.15)$$

donde:

f_{cv} es la resistencia efectiva del hormigón a cortante en N/mm^2 de valor $f_{cv} = f_{ck}$ con f_{cv} no mayor que 15 N/mm^2 en el caso de control indirecto de la resistencia del hormigón.

f_{ck} es la resistencia a compresión del hormigón en N/mm^2 . Se adoptaran valores de f_{ck} hasta 100 N/mm^2 .

Y donde:

$$\beta = \begin{cases} \frac{2 \cot \theta - 1}{2 \cot \theta_e - 1} & 0,5 \leq \cot \theta \leq \cot \theta_e \\ \frac{\cot \theta - 2}{\cot \theta_e - 2} & \cot \theta_e \leq \cot \theta \leq 2 \end{cases} \quad (3.16)$$

y θ_e es el ángulo de referencia de inclinación de las fisuras.

$$\xi = \left(1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \right) \leq 2 \quad (3.17)$$

3.3.1.2. Eurocódigo 2

La normativa europea para el diseño de elementos estructurales de hormigón armado (Eurocódigo 2) define un valor de cálculo para el esfuerzo cortante (V_{Ed}) a partir del cual se establece la necesidad o no de una armadura transversal de cortadura y se definen en base a ello las correspondientes formulaciones de cálculo (Eurocódigo-2, 2010). En aquellos elementos en los que se hace necesaria una armadura de cortante, el cálculo del esfuerzo cortante último (V_{Rd}) depende exclusivamente de la resistencia a cortante de la armadura transversal de acero implementada ($V_{Rd,s}$), no teniendo en cuenta en el cálculo la contribución del hormigón en la resistencia. La contribución del acero a la resistencia a cortante viene dada por la siguiente expresión:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{yw,d} (\cot \alpha + \cot \theta) \sin \alpha \quad (3.18)$$

donde:

A_{sw} es el área de la sección transversal de la armadura de cortante.

s es la separación de los cercos.

$f_{yw,d}$ es el valor de cálculo del límite elástico de la armadura de cortante.

z es el brazo mecánico.

α es el ángulo entre la armadura de cortante y el eje longitudinal de la viga.

θ es el ángulo entre la biela comprimida del hormigón y el eje longitudinal de la viga.

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad (3.19)$$

La resistencia a cortante en elementos con armadura trasversal está limitada por la resistencia al aplastamiento de las bielas a compresión del hormigón. Por lo tanto:

$$V_{Rd} \leq V_{Rd,max} \quad (3.20)$$

donde:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} (\cot \theta + \cot \alpha)}{1 + \cot^2 \theta} \quad (3.21)$$

y donde:

α_{cw} es un coeficiente que considera el estado tensional en el cordón de compresión.

v_1 es un coeficiente de reducción de la resistencia para hormigón fisurado a cortante:

$$v_1 = 0,6 \left(1 - \frac{f_{ck}}{250} \right) \quad (3.22)$$

3.3.1.3. ACI 318

La normativa estadounidense relativa al diseño y ejecución de elementos estructurales de hormigón armado (ACI-318R, 2008) define la resistencia nominal de una sección genérica a esfuerzos de cortadura (V_n) como la suma de la resistencia nominal proporcionada por el hormigón (V_c) y la resistencia nominal proporcionada por el armado transversal de acero (V_s) tal que

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.23)$$

La contribución del hormigón a la resistencia a cortante para elementos sometidos a flexión y cortante se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$V_c = 0,17\lambda\sqrt{f'_c}b_wd \quad (3.24)$$

donde f'_c es la resistencia a compresión del hormigón, b_w es el ancho del elemento y d es canto efectivo. El parámetro λ es un factor de reducción para hormigones ligeros. Para hormigones normales $\lambda = 1$.

La contribución de la armadura transversal de acero V_s :

$$V_s = \frac{A_{sw}f_{yw}}{s}(\sin \alpha + \cos \alpha)d \quad (3.25)$$

donde A_{sw} es el área de la armadura transversal, f_{yw} es el límite elástico, y s y α son el espaciado e inclinación del armado transversal respectivamente. Para evitar un exceso de fisuración en el hormigón y el agotamiento por compresión oblicua de éste se limita la resistencia a cortadura del armado transversal al siguiente valor:

$$V_s \leq 0,66\sqrt{f'_c}b_wd \quad (3.26)$$

3.3.2. Estudios experimentales sobre el refuerzo a cortante con NSM FRP

A continuación, se describen los principales estudios experimentales realizados sobre el refuerzo de vigas de hormigón armado frente a esfuerzos de cortadura mediante NSM FRP.

De Lorenzis y Nanni (De Lorenzis and Nanni, 2001) llevaron a cabo uno de los primeros estudios experimentales sobre el refuerzo a cortante mediante NSM FRP. En dicho estudio se consideraron un total de ocho vigas de hormigón armado de 3 m de longitud y sección en “T”. Seis de las vigas consideradas en el estudio carecían de armadura transversal. Como refuerzo externo se emplearon barras corrugadas de CFRP de 9,5 mm de diámetro e insertadas en ranuras cuadradas de 19 mm de lado y adheridas a éstas mediante un adhesivo de tipo epoxi. Las vigas fueron ensayadas mediante un ensayo de flexión en cuatro puntos con una luz de cortante de 1067 mm (tres veces el canto útil de la viga). Las variables consideradas en el estudio fueron el espaciado del refuerzo externo (127 mm y 178 mm), la orientación del NSM FRP (45 y 90°), el anclaje del FRP en el ala de la viga y la presencia o no de armadura transversal de acero. Entre los resultados obtenidos se demostró la efectividad del refuerzo mediante NSM FRP para aumentar la capacidad resistente. El incremento de resistencia obtenido respecto a las correspondientes vigas de referencia fue de aproximadamente el 105,7% para las vigas sin armadura transversal de acero y del 35% para las vigas con armadura transversal. El anclaje del refuerzo de NSM FRP en el ala de la viga resultó ser más efectivo que aumentar el número de barras de refuerzo o variar la orientación de éste. Los modos de fallo observados fueron la pérdida de adherencia de una o más barras de FRP, rotura del recubrimiento adhesivo del refuerzo y desprendimiento del recubrimiento inferior de hormigón de las vigas.

Nanni et al. (Nanni et al., 2004) realizaron un estudio sobre el refuerzo a cortante mediante NSM FRP en una viga de hormigón armado pretensado procedente de un puente en mal estado en Kansas (Estados Unidos de América). A partir de dos vigas en doble “T” de un puente seriamente deteriorado por el paso del tiempo se prepararon cuatro vigas de sección en “T” (915 mm de ancho y 585 mm de alto) y 12,2 m de longitud total. Una de las vigas fue utilizada como viga de control (sin refuerzo externo), dos vigas fueron reforzadas a flexión mediante pegado externo de laminados de CFRP y la última viga fue reforzada a flexión mediante el pegado externo de laminados de CFRP y a cortadura mediante láminas NSM CFRP. Las láminas de CFRP empleadas poseían una sección rectangular de 2 mm de espesor y 16 mm de ancho. El refuerzo fue insertado en ranuras de 6 mm de ancho y 19 mm de profundidad con una orientación de 60° respecto al eje longitudinal de la viga. El adhesivo empleado fue de tipo epoxi. El fallo final de la viga se produjo por flexión y por tanto no pudo ser determinada la capacidad resistente a cortadura última, sin embargo, en base a los resultados obtenidos en el resto de las vigas, se obtuvo un incremento en la resistencia a cortadura de al menos el 53%.

Barros y Dias (Barros and Dias, 2006) realizaron una amplia campaña experimental distribuida en diferentes etapas sobre el refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado mediante NSM FRP. En el estudio se analizaba la efectividad del refuerzo con

NSM y laminados pegados externamente (EB) en vigas con y sin armadura transversal de acero. Se consideraron dos tipos de viga y dos cuantías de armado longitudinal. La primera serie de vigas poseía una sección rectangular de 150 x 300 mm² y una luz de 1500 mm. La segunda serie de ensayos las vigas poseían una sección de 150 x 150 mm² y una luz de 900 mm. Las láminas de CFRP empleadas en NSM tenían un ancho de 10 mm y un espesor de 1,4 mm. Las dimensiones de las ranuras realizadas fueron de 12 mm de profundidad y 5 mm de ancho. Se consideraron a su vez dos orientaciones del FRP: 45 y 90°. Entre los principales resultados obtenidos se observó una mayor efectividad del refuerzo mediante NSM obteniéndose un incremento medio de resistencia entorno al 83% frente al 54% obtenido mediante EB. También se destacó un modo de fallo menos frágil de las vigas reforzadas mediante NSM FRP frente a las reforzadas mediante EB.

Kotynia (Kotynia, 2007) analizó el comportamiento de vigas de hormigón armado de sección en “T” reforzadas a cortadura mediante láminas de NSM CFRP orientadas a 45°. El tipo de adhesivo empleado en el estudio fue de tipo epoxi. Se consideraron un total de cinco vigas de 3100 mm de longitud, canto 360 mm y ancho de alma de 150 mm. Las vigas se ensayaron bajo un ensayo de flexión en cuatro puntos con una luz de cortante de 800 mm (2,58 veces el canto efectivo). Cada extremo de la viga se reforzó de distinta manera con objeto de analizar dos esquemas de refuerzo por viga. Se emplearon dos tipos de láminas de CFRP de 1,2 y 2,4 mm de espesor y 19 mm de ancho. En base a las dimensiones de las láminas de CFRP empleadas se consideraron dos geometrías de ranura. La profundidad de la ranura fue de 19 mm y un ancho de 4,5 y 5,5 mm. Los parámetros considerados en el estudio fueron el tipo de lámina de CFRP empleada y el espaciado entre láminas de refuerzo. Adicionalmente también se consideró en una de las vigas analizadas la influencia del corte de los cercos de acero sobre la efectividad del refuerzo mediante NSM FRP. Entre los principales resultados alcanzados se demostró la efectividad del NSM FRP como medio para incrementar la capacidad resistente a cortadura de las vigas.

Rizzo y De Lorenzis (Rizzo and De Lorenzis, 2009a) estudiaron el efecto del tipo de adhesivo epoxi, el espaciado e inclinación del refuerzo externo y el tipo de FRP (barra o lámina de CFRP) sobre la resistencia de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortadura mediante NSM FRP. Se consideraron un total de nueve vigas de 2 m de longitud y sección rectangular de 200 x 210 mm². Todas las vigas iban provistas de armadura longitudinal y transversal de acero dimensionada de tal forma que se garantizara el fallo final de la viga por cortadura en el extremo de la viga reforzado externamente con NSM FRP. Las vigas fueron sometidas a un ensayo de flexión en cuatro puntos con una luz de cortante de 519 mm (3 veces el canto útil de la viga). El programa de ensayos se componía de una viga de control (sin refuerzo externo de FRP), una viga reforzada externamente a cortadura mediante tejido de

CFRP y siete vigas reforzadas a cortadura mediante NSM FRP. Las variables consideradas en el estudio fueron el tipo de refuerzo externo (EB o NSM), el tipo de refuerzo de NSM (barra o lámina de CFRP), tipo de adhesivo (dos clases de adhesivo epoxi), inclinación del refuerzo de NSM (45 o 90°) y el espaciado del refuerzo de NSM FRP (45 y 73 mm para el refuerzo vertical, y 73 y 146 mm para el refuerzo a 45°). Entre los principales resultados alcanzados se comprobó una mayor resistencia de las vigas reforzadas mediante NSM respecto al refuerzo mediante EB. Para las vigas reforzadas mediante NSM el fallo se produjo a cortadura con desprendimiento del recubrimiento lateral de hormigón. Se comprobó también un mejor comportamiento del adhesivo epoxi de menor módulo de elasticidad y resistencia y una mayor resistencia para el refuerzo orientado a 45°.

Anwarul Islam (Anwarul Islam, 2009) estudió el comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas a cortante mediante barras de NSM CFRP orientadas verticalmente. El estudio contemplaba un total de cuatro vigas (una de ellas sin refuerzo) de 2134 mm de longitud total y sección rectangular de 254 x 305 mm. Las barras de CFRP empleadas poseían un diámetro nominal de 9 mm y fueron instaladas en ranuras cuadrangulares de 13 mm de ancho mediante adhesivo de tipo epoxi. Las vigas fueron ensayadas mediante un ensayo de flexión en cuatro puntos con una luz de cortante de 610 mm. Los resultados obtenidos indicaron un incremento medio en la resistencia del 20%. El modo de fallo observado fue por cortadura sin despegue o fractura del FRP.

Rahal y Rumaih (Rahal and Rumaih, 2011) analizaron el comportamiento de vigas de hormigón armado de sección en “T” reforzadas a cortante mediante NSM FRP. En el estudio se consideraron un total de cuatro vigas de 3,25 m de longitud, 500 mm de alto por 380 mm de ancho y un ancho de alma de 150 mm. Los parámetros considerados en el estudio fueron el tipo de refuerzo empleado (barra de fibra de carbono y barra de acero de 8 mm de diámetro), orientación del refuerzo (vertical e inclinado a 45°) y anclaje del refuerzo en el ala de la viga. Sobre cada viga se realizó un ensayo de flexión en cuatro puntos con una luz de cortante de 1290 mm (tres veces el canto útil de la viga). Una de las vigas fue considerada como viga de control (sin refuerzo externo) y el resto fue reforzado mediante NSM. Uno de los extremos de la viga fue reforzado mediante barras de CFRP mientras que el otro extremo fue reforzado bajo el mismo esquema de refuerzo, pero empleando barras de acero. Entre los principales resultados alcanzados se obtuvo un incremento de resistencia entre el 37 y el 92% respecto la viga de control, observándose un mejor comportamiento del CFRP frente al acero.

Jalali et al. (Jalali et al., 2012) realizaron un estudio experimental para probar un nuevo tipo de barra de CFRP manualmente modificada en los extremos para que estos actuaran como anclaje. Realizaron un total de 6 ensayos, incluida la patrón,

sobre vigas de hormigón de 200 x 250 mm² de sección insuficientemente armadas a cortante y una luz de ensayo de 1400 mm. Ensayaron seis tipos diferentes de extremos en las barras de FRP que mostraron su eficacia en el refuerzo.

Baghi et al. (Baghi et al., 2016) realizaron ensayos sobre siete vigas de sección en “T” ensayadas en tres puntos para forzar la rotura por cortante en uno de los extremos. En estos ensayos quisieron estudiar una nueva técnica de refuerzo consistente en colocar las láminas de CFRP a 45° sobre unas finas placas de hormigón con fibras que, una vez endurecidas, se unían a las almas de las vigas de hormigón armado que se pretendían reforzar. Las características del hormigón de las placas consiguen una mayor adherencia sobre el CFRP, a la vez que permiten la unión de éstas a las almas de las vigas no solo con resina, sino también por pasadores mecánicos. Se compararon los resultados con vigas reforzadas con NSM CFRP según el método usual, demostrando incremento de capacidad a cortante de hasta el 43%, limitada por la resistencia a cortante de la viga original. Igualmente, las vigas reforzadas por este sistema mostraron una mayor ductilidad tras el pico de carga de rotura. La posible limitación de este nuevo sistema sería su mayor complejidad y la necesidad de contar con un hormigón adecuado en la viga original.

3.3.3. Modelos de evaluación de la resistencia a cortante de vigas reforzadas a cortadura mediante NSM FRP

La dificultad para encontrar un modelo analítico que permita predecir con precisión el comportamiento de un elemento de hormigón armado sometido a esfuerzo cortante aumenta, lógicamente, cuando se incorpora sobre dicho elemento un refuerzo externo con objeto de incrementar su capacidad resistente a cortadura. Los métodos de cálculo incorporados en las distintas guías o documentos normativos sobre el refuerzo de elementos de hormigón armado con FRP consideran de aplicación, en el caso del refuerzo a cortante, el modelo aditivo usado en general para el hormigón estructural, incorporando en este caso un tercer sumando correspondiente a la contribución hecha por el refuerzo externo de FRP incorporado, resultando:

$$V = V_c + V_s + V_f \quad (3.27)$$

siendo V_c , V_s , y V_f el aporte hecho por el hormigón, la armadura transversal y el refuerzo externo de FRP respectivamente. Se asume que las contribuciones resistentes del hormigón y la armadura pasiva pueden determinarse a partir de la pertinente normativa de cálculo para el hormigón estructural. La contribución del FRP se determina, en cambio, en base a las indicaciones de cálculo planteadas en las distintas guías de diseño publicadas sobre la materia.

Este planteamiento, sin embargo, ha sido recientemente puesto en entredicho por diversos autores al cuestionar la independencia de los refuerzos de acero y FRP implementados cuando las respectivas cuantías de éstos hiciese que se pudiese alcanzar la rotura del elemento reforzado sin que se alcanzase la capacidad resistente máxima de alguno de los componentes, existiendo de esta manera una posible interacción entre la armadura interna (acero) y el refuerzo externo (FRP) (Sas et al., 2009). Esta objeción, real, puede no llegar a tener efecto para cuantías de armado y refuerzo usuales.

En hormigón armado, el método más extendido para estudiar la contribución de los cercos interiores es la utilización de fórmulas basadas en el método de bielas y tirantes. Sin embargo, este método no puede ser empleado en el caso de refuerzo con NSM ya que al actuar este solo en las caras exteriores no existen en la viga los nudos que materialicen las denominadas bielas y tirantes que caracterizan el método. Las formulaciones en este caso se basan en el comportamiento adherente del refuerzo cuando éste es atravesado por las fisuras de cortante generadas, efecto de cosido de las mismas.

A falta de un método analítico que permita obtener una formulación coherente y demostrable bajo hipótesis admisibles, distintos autores han presentado formulaciones más o menos próximas en general y basadas en su mayoría en métodos empíricos.

3.3.3.1. De Lorenzis y Nanni (2001)

De Lorenzis y Nanni (De Lorenzis and Nanni, 2001) fueron los primeros en proponer un modelo para el cálculo de la contribución del NSM FRP a la resistencia a cortadura de vigas de hormigón armado. Dicho modelo se fundamentaba en los resultados experimentales obtenidos por los autores sobre la resistencia a cortadura de vigas de hormigón armado reforzadas externamente mediante NSM FRP, así como en el estudio experimental realizado complementariamente sobre el comportamiento adherente de esta clase de refuerzo.

En el modelo propuesto, la contribución del refuerzo de NSM FRP a la resistencia a cortadura del elemento reforzado se limitaba a través de un valor mínimo entre dos resultados ligados respectivamente al fallo adherente y a la máxima deformación permisible del refuerzo.

$$V_{FRP} = \min(V_{1F}, V_{2F}) \quad (3.28)$$

El primer término (V_{1F}) tiene en cuenta la contribución del NSM FRP a la resistencia a cortadura del elemento en base al fallo adherente último de éste en concordancia con los modos de fallo previamente observados experimentalmente.

El segundo término (V_{2F}) calcula el aporte del NSM FRP en base a la máxima deformación permisible en el FRP de manera que se mantenga la integridad resistente del hormigón frente a esfuerzos de cortadura. A niveles superiores de dicha máxima deformación permisible, el ancho de las fisuras generadas podría ser tal que se perdería el aporte del hormigón en la resistencia a cortante a través del mecanismo de resistencia por engranamiento de áridos.

Para el cálculo de ambos términos se define previamente un valor reducido de la altura de la sección que contiene el refuerzo externo de NSM FRP:

$$d_{net} = d_r - 2c \quad (3.29)$$

donde d_r es la altura de la zona reforzada y c es el recubrimiento de hormigón en el refuerzo longitudinal.

Calculo de V_{1F} :

El término V_{1F} tiene en cuenta la contribución de la resistencia a cortante del NSM FRP en base al fallo adherente de éste en las proximidades del estado límite último. Se establecen las siguientes simplificaciones:

- El ángulo de inclinación de las fisuras es constante e igual a 45° .
- Se considera una distribución uniforme de la tensión de adherencia a lo largo de la longitud mínima adherida.
- La tensión de adherencia última se alcanza en todas las barras de FRP cortadas por la fisura principal.

El esfuerzo cortante resistente aportado por el NSM FRP se obtiene como la suma del esfuerzo cortante resistente de cada barra de FRP atravesada por la fisura principal (en ambas caras laterales), y este último puede ser calculado como el producto de la tensión de adherencia media y el área lateral de cada barra para la menor longitud de adherencia en la que idealmente quedan divididas éstas. Se tiene por tanto:

$$V_{1F} = 2 \sum A_i f_i = 2 \pi d_b \tau_b L_{tot} \quad (3.30)$$

donde A_i es la sección transversal de cada barra de FRP, f_i es la tensión de la barra en la localización de la fisura, d_b es el diámetro de la barra, τ_b es la tensión de adherencia media y L_{tot} es la suma de las longitudes mínimas adheridas de todas las barras de FRP atravesadas por la fisura principal. L_{tot} debe ser calculada para el caso más desfavorable que corresponde al valor mínimo de éste.

$$V_{1F} = 2 \pi d_b \tau_b L_{tot \min} \quad (3.31)$$

$L_{tot \min}$ depende de d_{net} , del espaciado entre barras de refuerzo s y de su inclinación. Para refuerzo vertical (90°):

$$\begin{aligned} L_{tot \min} &= d_{net} - s & \frac{d_{net}}{3} < s < d_{net} \\ L_{tot \min} &= 2 d_{net} - 4 s & \frac{d_{net}}{4} < s < \frac{d_{net}}{3} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Para refuerzo inclinado (45°):

$$\begin{aligned} L_{tot \min} &= (2 d_{net} - s) \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{2d_{net}}{3} < s < 2d_{net} \\ L_{tot \min} &= 2 \sqrt{2} (d_{net} - s) & \frac{d_{net}}{2} < s < \frac{2d_{net}}{3} \end{aligned} \quad (3.33)$$

Calculo de V_{2F} :

El término V_{2F} tiene en cuenta la contribución del NSM FRP en base a la máxima deformación admisible en éste fijada en $4000 \mu\epsilon$. La longitud de adherencia efectiva de un elemento de refuerzo de FRP cruzada por una fisura para un valor de deformación de $4000 \mu\epsilon$ es:

$$\bar{L}_l = 0,001 \frac{d_b E_b}{\tau_b} \quad (3.34)$$

donde E_b es el módulo de elasticidad del FRP. La máxima longitud de adherencia efectiva para una orientación del refuerzo de 90° es:

$$L_{i \max} = \frac{d_{net}}{2} \quad (3.35)$$

Y para una orientación de 45° es:

$$L_{i \max} = \frac{d_{net}}{\sqrt{2}} \quad (3.36)$$

Si $L_{i \max} < \bar{L}_l$ el cálculo de V_{2F} no es necesario, en caso contrario, V_{2F} debe ser calculado. Para una orientación del FRP de 90° se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{2F} &= 2 \pi d_b \tau_b \bar{L}_l & \frac{d_{net}}{2} < s < d_{net} \\ V_{2F} &= 2 \pi d_b \tau_b \bar{L}_l \frac{3 d_{net} - 4 s}{d_{net}} & \frac{d_{net}}{4} < s < \frac{d_{net}}{2} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Y para una orientación del FRP de 45° se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{2F} &= 2 \pi d_b \tau_b \bar{L}_l & d_{net} < s < 2 d_{net} \\ V_{2F} &= 2 \pi d_b \tau_b \bar{L}_l \frac{3 d_{net} - 2 s}{d_{net}} & \frac{d_{net}}{2} < s < d_{net} \end{aligned} \quad (3.38)$$

3.3.3.2. Rizzo y De Lorenzis (2009)

Rizzo y De Lorenzis (Rizzo and De Lorenzis, 2009b) generalizaron el modelo propuesto por De Lorenzis y Nanni (De Lorenzis and Nanni, 2001) y Nanni et al. (Nanni et al., 2004) para un ángulo de fisura variable y consideraron también la localización relativa de la fisura respecto al refuerzo de FRP.

La máxima deformación admisible en el FRP fue considerada a través de una tensión de adherencia reducida obtenida a partir de la máxima longitud de adherencia disponible. También se propuso un segundo modelo de cálculo en que se tiene en cuenta la curva tensión-deslizamiento local de la unión adhesiva:

$$V_f = 2 \left(\sum_{i=1}^{n_{s,f}} l_{emb,i} \right) p \tau_f \sin \alpha = 2 l_{emb,tot} p \tau_f \sin \alpha \quad (3.39)$$

donde $n_{s,f}$ es el número de barras cortadas por la fisura crítica, $l_{emb,i}$ es la mínima longitud adherida de la barra i , es decir, es el valor mínimo entre las longitudes $l_{s,i}$ y $l_{i,i}$ (Figura 3.11), p es el perímetro en el cual se aplica la tensión de adherencia, τ_f es la tensión de adherencia y α es el ángulo de las barras de FRP respecto al eje longitudinal de la viga.

Figura 3.11 Cálculo de la longitud adherida en el modelo de Rizzo y De Lorenzis (Rizzo and De Lorenzis, 2009b).

Para cualquier geometría de la viga, V_f depende de α , θ (ángulo de la fisura respecto al eje longitudinal de la viga) y la posición relativa entre la fisura de cortante y el

sistema de refuerzo. El cálculo de V_f se realiza considerando la posición más desfavorable para el inicio de la fisura.

La longitud total mínima $l_{emb,tot,min}$ para el caso más desfavorable viene dada por:

$$l_{emb,tot,min} = \left\{ n^* [\cot\theta + \cot\alpha] - (n^*)^2 \frac{s_f}{h_{net}} \right\} \frac{\sin\theta}{\sin(\alpha + \theta)} h_{net} \quad (3.40)$$

donde n^* el número de barras para las cuales la longitud mínima adherida coincide con la localizada por encima de la fisura para el caso particular de $z_1 = 0$ (Figura 3.11), s_f es el espaciamiento entre barras de FRP y h_{net} la altura efectiva de la viga:

$$h_{net} = h - c_i - c_s \quad (3.41)$$

$$r^* = [\cot\theta + \cot\alpha] \frac{h_{net}}{s_f} \quad (3.42)$$

$$n^* = |r^*| - \left\lfloor \frac{r^*}{2} \right\rfloor \quad (3.43)$$

donde a su vez c_i y c_s son los recubrimientos de la armadura inferior y superior de acero y la superficie exterior de la viga y h es la altura de la viga.

Finalmente se define un valor límite superior para el aporte hecho por el FRP ($\bar{V}_f$) con objeto de evitar una apertura de fisura excesiva que impida el engranamiento de áridos. Para este fin se limita la deformación máxima en el FRP ($\varepsilon_{f,max}$) a un valor de 0,004 y se define un valor reducido para la tensión de adherencia ($\tau_{f,red}$) dado por:

$$\tau_{f,red} = \frac{l_i}{l_{emb,max}} \tau_f \quad (3.44)$$

con

$$l_i = \frac{A_f E_f \varepsilon_{f,max}}{p \tau_f} \quad (3.45)$$

$$l_{emb,max} = \frac{h_{net}}{2 \sin\alpha} [1 - (-1)^{|r^*|}] + (-1)^{|r^*|} \frac{n^* s_f}{\sin\alpha [\cot\theta + \cot\alpha]} \quad (3.46)$$

y donde l_i es la longitud adherida de una barra cortada por una fisura para $\varepsilon_{f,max}$, A_f es la sección del FRP, E_f es el módulo de elasticidad del FRP y $l_{emb,max}$ es la mayor longitud mínima de adherencia entre todas las barras cortadas por la fisura principal. Finalmente, el límite superior para el aporte hecho por el FRP viene dado por:

$$\bar{V}_f = 2p l_{emb,tot,min} \tau_{f,red} \sin\alpha \quad (3.47)$$

3.3.3.3. Bianco et al. (2007)

Bianco et al. (Bianco et al., 2007) propusieron un nuevo modelo para el cálculo de la contribución de láminas de NSM CFRP a la resistencia a cortadura de vigas de hormigón armado. Dicho modelo se centraba fundamentalmente en el modo de fallo observado en estudios experimentales previos consistente en el despegue del recubrimiento lateral de hormigón en torno a la zona reforzada mediante NSM FRP. Según los autores, la rotura del hormigón asociada a este despegue se produce a través de superficies de rotura semicónicas generadas alrededor del refuerzo de NSM FRP al paso del frente de fisura principal que provoca el fallo final del elemento (Figura 3.12).

Figura 3.12 Plano de fisura y parámetros de cálculo en el modelo de Bianco et al. (Bianco et al., 2007).

En base a éste y otros posibles modos de fallo, la contribución del refuerzo externo de NSM FRP, V_f , a la resistencia a cortadura de la viga puede ser calculada como la suma de la contribución de cada lámina de CFRP, V_{fi}^p , proyectando la fuerza resultante ortogonalmente respecto al eje longitudinal de la viga.

$$V_f = 2 \cdot \sin \beta \cdot \sum_{i=1}^{N_f} V_{fi}^p \quad (3.48)$$

Donde β es la inclinación del refuerzo de FRP y N_f es el número total de láminas de FRP cortadas por el plano de fisura principal.

La contribución de cada lámina de FRP, V_{fi}^p , puede ser considerada como el mínimo entre tres posibles valores relacionados con el fallo de éstas: fallo debido al despegue, $V_{fi}^{p,db}$, fallo por ruptura de la lámina, $V_{fi}^{p,tr}$, o fallo por rotura en el hormigón, $V_{fi}^{p,cf}$:

$$V_{fi}^p = \min \{ V_{fi}^{p,db}; V_{fi}^{p,tr}; V_{fi}^{p,cf} \} \quad (3.49)$$

El término relacionado con el fallo adherente de cada lámina puede ser calculado como:

$$V_{fi}^{p,db} = 2 \cdot (a_f + b_f) \cdot \tau_b(L_f) \cdot L_{fi} \quad (3.50)$$

Donde a_f y b_f son, respectivamente, el espesor y ancho de las láminas de FRP y $\tau_b(L_f)$ es la tensión de adherencia media en función de la longitud adherida.

El término relacionado con la rotura del FRP puede ser calculado como:

$$V_{fi}^{p,tr} = a_f \cdot b_f \cdot f_{fu} \quad (3.51)$$

donde f_{fu} es la resistencia última del FRP.

El término relacionado con la rotura en el hormigón puede obtenerse como:

$$V_{fi}^{p,cf} = \int_{C_{fi}(L_{fi}; \alpha_{fi})} (f_{ctm} \cdot \sen \alpha_{fi}) \cdot dC_{fi} \quad (3.52)$$

Para el caso particular en el que el refuerzo se instala perpendicular al plano de fisura principal y no existe interacción entre elementos de refuerzo de FRP vendría dado por:

$$V_{fi}^{p,cf} = \frac{\pi}{2} \cdot f_{ctm} \cdot \tan^2 \alpha_{fi} \cdot L_{fi}^2 \quad (3.53)$$

En el caso general en el que hay interacción entre elementos de refuerzo de FRP y las barras están orientadas verticalmente, la superficie de fractura semicónica resulta más difícil de modelar y la capacidad resistente a cortadura debido a la fractura del hormigón se vuelve mucho más compleja de determinar.

3.3.3.4. Bianco et al. (2014)

Bianco et al. (Bianco et al., 2014) introdujeron nuevas simplificaciones al modelo de cálculo propuesto en (Bianco et al., 2007) y en sucesivos trabajos (Bianco et al., 2009, Bianco et al., 2010, Bianco et al., 2011) y presentaron una formulación de cálculo simplificada para el cálculo de la contribución a la resistencia a cortadura en vigas de hormigón armado del refuerzo mediante láminas de NSM CFRP. El procedimiento de cálculo planteado contempla como parámetros de entrada: ancho b_w y alto h_w de la sección reforzada; ángulo del plano principal de fisura θ y de las láminas de FRP β ; espaciado del refuerzo s_f ; ángulo entre el eje y la principal generatriz de la semi-piramidal superficie de rotura del hormigón α ; resistencia del hormigón a compresión

media f_{cm} ; resistencia última f_{fu} y módulo de elasticidad E_f del FRP; espesor a_f y ancho b_f de la lámina de FRP; y tensión de adherencia τ_0 y deslizamiento δ_1 de acuerdo a la relación tensión de adherencia-deslizamiento adoptada. El procedimiento de cálculo comprende los siguientes pasos:

- Evaluación del valor medio de la longitud de adherencia resistente disponible $\bar{L}_{Rfi}$ y el número mínimo de láminas de FRP $N_{f,int}^l$ interceptadas por el plano de fisura principal:

$$\bar{L}_{Rfi} = \frac{h_w \cdot \sin \theta \cdot (\cot \theta + \cot \beta)}{4 \cdot \sin(\theta + \beta)} \quad (3.54)$$

$$N_{f,int}^l = \text{round off} \left(h_w \cdot \frac{(\cot \theta + \cot \beta)}{s_f} \right) \quad (3.55)$$

- Evaluación de constantes geométricas y de integración:

$$L_p = 2 \cdot b_f + a_f \quad (3.56)$$

$$A_c = s_f \cdot \frac{b_w}{2} \quad (3.57)$$

$$L_d = \frac{h_w}{\sin \theta} \quad (3.58)$$

$$V_f^{tr} = a_f \cdot b_f \cdot f_{fu} \quad (3.59)$$

$$J_1 = \frac{L_p}{A_f} \cdot \left(\frac{1}{E_f} + \frac{A_f}{A_c \cdot E_c} \right); \frac{1}{\lambda^2} = \frac{\delta_1}{\tau_0 \cdot J_1}; C_3 = \frac{V_f^{tr}}{L_p \cdot \lambda} \quad (3.60)$$

$$L_{Rfe} = \frac{\pi}{2 \cdot \lambda}; V_{f1}^{bd} = \frac{L_p \cdot \lambda \cdot \delta_1}{J_1} \quad (3.61)$$

- Evaluación del factor de reducción η del valor medio de la longitud de adherencia resistente disponible y el valor equivalente de la longitud de adherencia resistente media $\bar{L}_{Rfi}^{eq}$:

$$\eta(s_f; b_w; f_{cm}; \bar{L}_{Rfi}) = \begin{cases} f_{ctm}/f_{ctm}^* & f_{ctm} < f_{ctm}^* \\ 1 & f_{ctm} \geq f_{ctm}^* \end{cases} \quad (3.62)$$

$$f_{ctm}^* = \frac{L_p \cdot \lambda \cdot \delta_1 \cdot \sin(\lambda \cdot L_{Rfi})}{J_1 \cdot \min\left(L_{Rfi} \cdot \tan \alpha; \frac{b_w}{2}\right) \cdot \min(s_f \cdot \sin \beta; 2 \cdot L_{Rfi} \cdot \tan \alpha)} \quad (3.63)$$

$$L_{Rfi} = \begin{cases} \bar{L}_{Rfi} & \bar{L}_{Rfi} \leq L_{Rfe} \\ L_{Rfe} & \bar{L}_{Rfi} > L_{Rfe} \end{cases} \quad (3.64)$$

$$\bar{L}_{Rfi}^{eq} = \bar{L}_{Rfi} \cdot \eta(s_f; b_w; f_{cm}; \bar{L}_{Rfi}) \quad (3.65)$$

- Evaluación del valor del deslizamiento final impuesto δ_{Lu} en relación con el valor máximo de la fuerza transmisible por adherencia a través del valor equivalente de la longitud de adherencia resistente media $\bar{L}_{Rfi}^{eq}$:

$$\delta_{Lu}(\bar{L}_{Rfi}^{eq}) = \begin{cases} \delta_{L1}(\bar{L}_{Rfi}^{eq}) & V_{f1}^{bd} < V_f^{tr} \\ \min[\delta_{L1}(\bar{L}_{Rfi}^{eq}); \delta_{Li}(V_f^{tr})] & V_{f1}^{bd} \geq V_f^{tr} \end{cases} \quad (3.66)$$

$$\delta_{L1}(\bar{L}_{Rfi}^{eq}) = \begin{cases} \delta_1 \cdot [1 - \cos(\lambda \cdot \bar{L}_{Rfi}^{eq})] & \bar{L}_{Rfi}^{eq} \leq L_{Rfe} \\ \delta_1 & \bar{L}_{Rfi}^{eq} > L_{Rfe} \end{cases} \quad (3.67)$$

$$\delta_{Li}(V_f^{tr}) = \delta_1 \cdot \left[1 - \cos\left(-\arcsen\frac{C_3}{\delta_1}\right) \right] \quad (3.68)$$

- Evaluación de la capacidad máxima efectiva que la longitud de adherencia $\bar{L}_{Rfi}^{eq}$ puede transmitir durante el proceso de carga:

$$V_{fi,eff}^{max} = V_{fi,eff}(\gamma_{max}) = \frac{\delta_1 \cdot A_2}{2 \cdot L_d \cdot A_3 \cdot \gamma_{max}} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \arcsen \psi - \psi \cdot \sqrt{1 - \psi^2} \right) \quad (3.69)$$

$$A_2 = \frac{L_p \cdot \lambda}{J_1}; A_3 = \frac{\sin(\theta + \beta)}{2 \cdot \delta_1}; \gamma_{max} = \frac{2 \cdot \delta_{Lu}}{L_d \cdot \sin(\theta + \beta)}; \psi = 1 - A_3 \cdot \gamma_{max} \cdot L_d \quad (3.70)$$

- Evaluación de la contribución a la resistencia a cortadura del NSM FRP:

$$V_{fd} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot V_f = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot (2 \cdot N_{f,int}^l \cdot V_{fi,eff}^{max}) \sin \beta \quad (3.71)$$

3.3.3.5. Baghi y Barros (2017)

Baghi y Barros (Baghi and Barros, 2017) adoptan el modelo de la Teoría Modificada de Campos de Compresión con la simplificación propuesta en el trabajo de Bianco et al. (Bianco et al., 2014). Proponen la ecuación:

$$v = v_c + v_s + v_{fd} = \beta \sqrt{f'_c} + \rho_y f_{yield} \cot \theta + 2 N_{f,int}^l \cdot V_{fi,eff}^{max} \frac{\sin \theta_f}{b_w d} \quad (3.72)$$

y un algoritmo de resolución:

Paso1: Introducción de los parámetros;

Paso 2: Asumir un valor para la deformación longitudinal ε_x ;

Paso 3: Calcular la separación de fisuras por la fórmula dada en el modelo;

Paso 4: Calcular θ y β ;

Paso 5: Calcular la resistencia a cortante mediante la ecuación 3.72;

Paso 6: Calcular la deformación longitudinal ε_x y comparar con la asumida en el paso 1. Vuelta al paso 2 con la nueva ε_x . Repetir hasta obtener el error deseado.

Para contrastar esta formulación construyen una base de datos formada por 100 ensayos de vigas reforzadas a cortante con NSM FRP obtenidas de la literatura, entre las que se encuentran los resultados de esta tesis presentados en (Cisneros et al., 2012). Con ella obtiene un valor medio de la predicción analítica sobre la experimental de 1,09 con un coeficiente de variación del 11%.

CAPÍTULO 4

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO ADHERENTE DEL NSM FRP

4.1. Introducción

Tal y como se indicaba en el capítulo anterior, el funcionamiento conjunto de cualquier sección compuesta se encuentra condicionado esencialmente por la adecuada adherencia entre los materiales constituyentes. En el caso del hormigón armado, la adherencia entre el hormigón y la armadura de acero ha sido ampliamente estudiada, tanto analítica como experimentalmente a lo largo de los años, llegándose a obtener modelos teóricos de comportamiento cuyas mayores incertidumbres consisten en los valores de los parámetros que representen adecuadamente las propiedades de los materiales. Los distintos procedimientos experimentales de ensayo utilizados generalmente para caracterizar el comportamiento adherente entre el hormigón y la armadura interna, como se ha indicado en el capítulo anterior, se pueden agrupar bajo dos modalidades de ensayo: ensayo de arrancamiento (conocido como *pull-out test*) o ensayo de viga (conocido como *beam test*).

Cuando un elemento estructural se refuerza externamente con materiales compuestos FRP (ya sea mediante el pegado externo de laminados o mediante la técnica NSM), la adherencia condiciona la transmisión de tensiones entre el elemento que se refuerza y el material FRP de refuerzo. En el caso de refuerzo por pegado externo de laminados (EB), se han realizado ya numerosos estudios experimentales, siendo el ensayo tipo *pull-out* el más utilizado por su sencillez y se han propuesto diversos modelos. Debido a que el NSM es una técnica mucho más novedosa, los trabajos realizados son todavía muy escasos.

A pesar de que el NSM presenta ventajas respecto al EB, la adherencia sigue siendo crítica en la resistencia a cortante y es necesario desarrollar un amplio esfuerzo para encontrar los parámetros que deben introducirse en las formulaciones de cortante existentes, modelos teóricos y formulaciones en guías de cálculo.

Como se ha indicado la adherencia en un elemento reforzado con materiales compuestos mediante NSM depende de múltiples parámetros: las características del sustrato de hormigón, las dimensiones de la roza donde se inserta el refuerzo, las propiedades del material de relleno de la roza (generalmente adhesivos epoxi, pero también se han estudiado morteros) y las características de la barra o lámina (especialmente la forma de la sección, rugosidad y durabilidad de la misma). Precisamente la gran diversidad de elementos y acabados superficiales de los refuerzos que se utilizan como NSM (barras con distintas secciones, láminas, acabado superficial liso, ligeramente rugoso, con recubrimiento de arena, en espiral o corrugadas) dificulta el establecimiento de formulaciones generales y hace necesario el estudio de la adherencia para cada tipo de elemento de refuerzo utilizado.

En este capítulo se muestra el programa de ensayos de adherencia llevado a cabo en esta tesis doctoral. Se pretende caracterizar la adherencia para los materiales de refuerzo que se emplean posteriormente en el programa experimental sobre refuerzo de vigas a cortante que se presenta en el capítulo siguiente. El objetivo principal es determinar los parámetros que se utilizarán en el modelo de cortante, esencialmente la tensión máxima de adherencia o máxima fuerza de anclaje desarrollada por el refuerzo.

Como refuerzo FRP se han empleado dos tipos de elementos: una barra y una lámina. En ambos casos son elementos fabricados por pultrusión con fibra de carbono y resina epoxi, y el acabado es prácticamente liso. La roza se rellena con un adhesivo epoxi bicomponente. Se han elegido estos materiales de refuerzo por su disponibilidad, y debido a que actualmente son los que más se utilizan en aplicaciones prácticas.

Dado que este programa no se ha desarrollado para la comparación entre distintas soluciones de NSM o resinas, donde los ensayos *pull-out*, más sencillos de realizar, podrían ser suficientes, sino para determinar los valores de máxima adherencia, se ha considerado más pertinente llevar a cabo el programa experimental en base al ensayo de *beam test*. Este tipo de ensayo, a pesar de su mayor complejidad, permite obtener un valor de la tensión de adherencia de rotura que puede incorporarse de manera más coherente a las formulaciones de cálculo.

4.2. Programa experimental

Se ha llevado a cabo un programa experimental con el fin de caracterizar la adherencia de dos tipos de elementos de FRP que se emplean habitualmente en el refuerzo de elementos de hormigón mediante la técnica NSM: una barra de 8 mm de diámetro y una lámina de sección rectangular de 2,5 x 15 mm². Se han realizado ensayos de adherencia de tipo *beam test* y para ello se ha adaptado el ensayo normalizado que se utiliza para caracterizar el comportamiento adherente entre el hormigón y la armadura interna de acero, a las particularidades del NSM, tal y como se describe más adelante.

El programa se compone de un total de 25 vigas, incluidos los dos tipos de CFRP (barra y lámina). Cada viga está formada por dos bloques de hormigón en los que se disponen dos valores dispares de longitud de adherencia, L_{b1} y L_{b2} , con un sistema de anclaje en uno solo de los extremos (el correspondiente a la menor longitud de adherencia), de manera que por cada viga se obtienen dos resultados.

Las variables del programa son: el tipo de elemento FRP de refuerzo (barra o lámina) y la longitud de adherencia: 48, 96 y 144 mm (correspondiente respectivamente a 6, 12 y 18 veces el diámetro de la barra de CFRP). La combinación de las distintas longitudes de adherencia y los dos tipos de CFRP empleados se resumen en la Tabla 4.1. La nomenclatura utilizada para identificar cada ensayo consiste en una letra inicial (B o L) que indica el tipo de FRP empleado (Barra o Lámina) seguido de un código numérico que indica las longitudes de adherencia analizadas simultáneamente (48, 96 y 144 mm) en cada viga. Las dificultades iniciales para encontrar unos dispositivos de anclaje adecuados para el ensayo en dos partes planteado hicieron que, en el caso de barras, el número de ensayos válidos para cada una de las longitudes de adherencia no sea homogéneo.

Referencia viga	Tipo FRP	Long. Adh. 1 [mm]	Long. Adh. 2 [mm]	Nº de ensayos
B(48-96)	Barra	48	96	9
B(48-144)	Barra	48	144	6
B(96-144)	Barra	96	144	1
S(48-96)	Lámina	48	96	3
S(48-144)	Lámina	48	144	3
S(96-144)	Lámina	96	144	3

Tabla 4.1 Programa de ensayos en el estudio de la adherencia del NSM FRP.

El ensayo normalizado *beam test* utilizado para la armadura de acero convencional tuvo que ser modificado en tres aspectos fundamentalmente: la disposición de la armadura interna de los bloques de hormigón, los captadores de desplazamiento y el dispositivo de anclaje en la semiviga con menor longitud adherida que permite continuar el ensayo en el otro bloque. Estas modificaciones se detallan en los siguientes apartados. En la Figura 4.1 se muestra el dispositivo de ensayo adaptado al NSM. Los puntos de aplicación de la carga, soportes y demás dimensiones de la viga no fueron alterados respecto al ensayo normalizado.

Figura 4.1 Geometría de las vigas y disposición del ensayo.

4.3. Descripción y fabricación de las vigas

La viga usada en el estudio está formada por dos bloques paralelepípedos de hormigón armado interconectados en la parte superior mediante una rótula metálica y en la inferior a través de una barra o lámina de CFRP cuyo comportamiento adherente se desea analizar.

Las dimensiones generales de la viga son idénticas a las indicadas en la normativa para el estudio de la adherencia de barras de acero empleadas como armaduras pasivas para barras con un diámetro inferior a 16 mm. La viga presenta en su conjunto una longitud total de 800 mm y una sección rectangular de 100 x 180 mm².

En cuanto a las diferencias, en un ensayo convencional de adherencia de este tipo la barra de acero está situada en el interior de la armadura de ambos bloques, de manera que esta proporciona a la barra objeto de estudio cierto grado de

confinamiento. En el refuerzo mediante NSM, la barra o lámina de FRP se instala en una ranura en el recubrimiento exterior a la armadura realizada en la cara inferior de la viga. Este hecho, junto con la profundidad de ranura fijada, obliga a modificar ligeramente el tamaño y disposición de los cercos de acero de forma que se asegure un recubrimiento de hormigón suficiente en la cara inferior que permita con posterioridad la realización de la ranura característica del NSM y la correcta instalación de las barras o láminas de FRP consideradas.

Con estas modificaciones de ensayo la relación entre la carga P aplicada a la viga y la fuerza F que se transmite a la barra/lámina viene dada por la expresión:

$$F = \frac{25}{28}P \quad 4.1$$

y de ella, la tensión media de adherencia se obtiene de la siguiente manera:

en la barra,

$$\tau_m = \frac{F}{\pi D L_b} = \frac{F}{8\pi L_b} \quad 4.2a$$

y en la lámina,

$$\tau_m = \frac{F}{2(a + e) L_b} = \frac{F}{35L_b} \quad 4.2b$$

siendo: τ_m la tensión de adherencia media en MPa, P la fuerza aplicada sobre la viga en N, F la fuerza de tracción que transmite la barra o lámina y L_b la longitud de barra/lámina adherida en mm.

También hubo que modificar el sistema de anclaje en los extremos de las barras/láminas para evitar la rotura de la viga una vez que se produce el deslizamiento en la semiviga con menor longitud de refuerzo adherida. Para ello, en el lado con menor longitud de anclaje, el extremo de la barra/lámina que sobresale de la viga se inserta en un tubo metálico hueco que se rellena con resina epoxi. El diámetro interior del tubo es ligeramente superior a la barra/lámina y su longitud suficiente para poder anclar la barra una vez que ésta haya deslizado en ese extremo.

Para la fabricación de las vigas se empleó un molde metálico formado esencialmente por perfiles de acero en “U” unidos convenientemente mediante tornillería de tal forma que se permita el hormigonado de varias vigas de manera simultánea. La separación entre los dos bloques de hormigón que conforman en su conjunto la viga de ensayo se realizó con la propia rótula metálica empleada con posterioridad durante el ensayo y

un taco de madera con las dimensiones requeridas unido todo al molde metálico en la posición correspondiente.

La armadura de acero de cada viga se coloca dentro del molde suspendida lateralmente mediante una serie de varillas de acero dispuestas a lo largo del molde que aseguren su posición en el molde y garanticen el correcto recubrimiento inferior. El acero empleado en el armado de los bloques es del tipo B500S.

Una vez situada la armadura se procede al hormigonado de las vigas en series de cuatro vigas mediante un hormigón convencional elaborado en el propio laboratorio (Figura 4.2). El control de la resistencia del hormigón vertido en cada caso se obtiene a través de tres probetas cilíndricas normalizadas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Todas las vigas, junto con sus correspondientes probetas testigo, son almacenadas bajo condiciones sensiblemente constantes de humedad y temperatura en el laboratorio hasta el comienzo del proceso de ranurado e instalación del NSM FRP. Las probetas testigo para determinar la resistencia del hormigón se rompen en la fecha de ensayo de las vigas correspondientes. La resistencia media obtenida para las tres probetas en las distintas series oscila entre 17,94 y 27,35 MPa.

Figura 4.2 Hormigonado de las vigas y probetas testigo.

4.4. Materiales de refuerzo

Como se ha indicado, los programas experimentales presentado en este trabajo, tanto los ensayos de cortante como los de adherencia, que se desarrollan en este capítulo, se han llevado a cabo estudiando dos tipos de elementos de refuerzo de NSM FRP: barras y láminas. En cuanto a sus dimensiones, las barras poseen un diámetro de 8 mm mientras que las láminas presentan una sección rectangular de 15 mm de anchura y 2,5 mm de espesor. Dichas dimensiones definen un área de la sección para la lámina de 37,5 mm² y de 50,3 mm² para la barra, un 34% superior. El perímetro de la

sección de la lámina es de 35 mm y de 25,13 mm en la barra, un 28% inferior (y en esa proporción estarán las superficies adherentes para la misma longitud).

Los dos tipos de elementos están constituidos por resina epoxi reforzada con fibra de carbono, y se fabrican mediante pultrusión con toda la fibra orientada longitudinalmente. Se presentan recubiertas de un film de plástico protector que debe retirarse antes de su uso. El acabado es prácticamente liso. Las barras y láminas no llevan ningún tipo de corruga, espiral ni recubrimiento de arena, pero la capa exterior (*peel-ply*) sí tiene un tratamiento superficial que le confiere una muy ligera rugosidad superficial (ver Figura 4.3).

Figura 4.3 Aspecto de las barras y láminas de FRP empleadas en los ensayos.

En la Tabla 4.2 se muestran las propiedades de barras y láminas según las especificaciones suministradas por el fabricante.

Refuerzo FRP	Barra/Lámina
Densidad [g/cm^3]	1,6
Volumen de fibra (aprox.) [%]	65
Módulo de elasticidad mínimo [GPa]	158
Módulo de elasticidad medio [GPa]	165
Resistencia a tracción mínima [MPa]	2200
Resistencia a tracción media [MPa]	2500
Elongación a rotura mínima [%]	1,3
Elongación a rotura media [%]	1,5

Tabla 4.2 Propiedades de las barras (MBrace Mbar 165/2500) y láminas (MBrace Cut-In).

Con objeto de hacer una verificación de los valores del módulo de elasticidad dado por el fabricante se realizaron ensayos de determinación sobre láminas (Figura 4.4), que

arrojaron los siguientes resultados: número de probetas, 7; media, 149,89 MPa; coeficiente de variación, 6,29%. Estos valores son ligeramente inferiores a los dados por el fabricante, pero se pueden considerar coherentes con ellos.

Figura 4.4 Determinación del módulo de elasticidad de las láminas en prensa.

Se utilizaron los adhesivos recomendados por el fabricante para cada tipo de elemento (*MBrace Laminate Adhesive HT* para las barras y *Masterflow 920 SF* para las láminas). Ambos son adhesivos epoxi bicomponentes. El primero de ellos es el que se utiliza habitualmente para el pegado exterior de laminados mientras que el segundo es un adhesivo para anclajes estructurales que se aplica con pistola y permite una más fácil colocación en las rozas de las láminas que son más profundas. Son adhesivos estructurales con consistencia tixotrópica de manera que en estado fresco permiten mantener el elemento de refuerzo en su posición sin necesidad de ningún elemento auxiliar de sujeción.

4.5. Preparación e instalación del NSM FRP

Pasados al menos 28 días desde el hormigonado de los bloques de hormigón que conforman cada viga se realiza el ranurado de los mismos con ayuda de una sierra circular de mesa (Figura 4.5). En las probetas que van a ser reforzadas con láminas las ranuras tienen unas dimensiones de 20 mm de profundidad y 7 mm de anchura, mientras que aquellas que se van a reforzar con barras, las ranuras tienen 12 mm de ancho por 20 mm de profundidad. El polvo y la suciedad generados durante el corte son seguidamente eliminados mediante agua a presión para a continuación dejarlos secar en ambiente limpio.

Figura 4.5 Realización de la ranura en uno de los bloques que conforman la viga.

Una vez la superficie de las ranuras está completamente seca, cada pareja de bloques, junto con la correspondiente rótula de unión, deben ser alineadas para proceder al refuerzo y posteriormente al montaje del ensayo. Estas operaciones deben realizarse con sumo cuidado de manera que en todo momento se mantengan en su posición relativa todos los elementos (bloques de hormigón, rótula, y elemento FRP de refuerzo) sin que haya ningún movimiento que podría afectar a la alineación de la viga o dañar la zona de adherencia.

Con este fin se ideó un sistema de sujeción consistente en dos planchas de acero unidas mediante tornillería que se colocan en los laterales de la viga. Entre las planchas de acero y los bloques de hormigón se colocan a su vez dos láminas de neopreno para evitar posibles daños durante el apriete de los tornillos de unión. Longitudinalmente se coloca una mordaza extensible que une provisionalmente todo el conjunto (Figura 4.6). Este dispositivo se mantiene durante las labores de refuerzo y colocación de la probeta en su posición de ensayo.

Figura 4.6 Montaje de la probeta en los ensayos de adherencia.

Antes de iniciar el refuerzo se ha procedido al corte de las barras/láminas de FRP a la longitud requerida, se ha retirado el film de plástico protector de las mismas, y se ha pegado el tubo de acero que actuará de anclaje en uno de los extremos (Figura 4.7).

Así mismo, en cuatro de las vigas en las que se consideraba una longitud de adherencia de 96 mm se ha instrumentado la barra o lámina con dos bandas extensométricas. La primera banda se sitúa a una distancia desde el extremo de la barra coincidente con el centro de vano de la viga de ensayo. La otra banda extensométrica se sitúa en medio de la mayor longitud de adherencia considerada en este caso (96 mm) de tal forma que la longitud adherida queda dividida en dos partes (ver Figura 4.7). El objeto de estas bandas sería medir las deformaciones en esos puntos y comparar la fuerza de arrancamiento obtenida por la medición de las deformaciones con la que se obtiene por la expresión (4.1) y comprobar el correcto funcionamiento del sistema.

Figura 4.7 Detalle de los tubos de acero de anclaje (izquierda) y barra instrumentada con banda extensométrica (derecha).

A continuación, una vez alineada la pareja de bloques, se limpia nuevamente la superficie de la ranura, esta vez con aire comprimido, y se delimitan las longitudes de adherencia de cada bloque. El siguiente paso es rellenar la zona de adherencia parcialmente con adhesivo y se coloca a continuación la barra o lámina de CFRP presionando ligeramente hasta que el adhesivo fluye entre el CFRP y la superficie de la ranura. Seguidamente se añade más adhesivo hasta rellenar completamente la zona de adherencia para finalmente nivelar la superficie y eliminar el adhesivo sobrante (Figura 4.8).

Figura 4.8 Instalación del NSM FRP en los ensayos de adherencia.

4.6. Procedimiento de ensayo

Tras una semana, al menos, de la colocación de la barra/lámina, para asegurar el completo endurecimiento de la resina, la viga formada por los dos bloques unidos por la barra en estudio en la parte inferior y la rótula de compresión en la superior, todavía con la coacción lateral para impedir el desplazamiento, se coloca en la disposición de ensayo sobre dos apoyos articulados y sobre ella se coloca una pieza de acero también con dos apoyos articulados que reparten la carga aplicada sobre los dos bloques. La situación de los apoyos y puntos de carga es la indicada en la norma de ensayo y se muestra en la Figura 4.1.

El sistema de apoyos y reparto de carga está diseñado para permitir el libre giro de los bloques y que, aun con deslizamientos importantes, la distancia de los apoyos y puntos de carga permanezcan constantes y, por tanto, se mantengan constantes la relación entre la carga aplicada y la tensión en la barra.

Una vez situada la viga en su posición de ensayo, se colocan en los extremos de la barra o lámina los elementos que mantienen los captadores de desplazamiento en su posición. A continuación, se retira la sujeción lateral y se realiza el ensayo. El deslizamiento relativo del FRP respecto a cada bloque de hormigón es controlado a través de tres captadores de desplazamiento situados en ambos extremos de la barra o dos en el caso de lámina (Figura 4.9).

La carga se aplica mediante un gato Amsler de 500 kN de capacidad máxima accionado por una central estática de presión también Amsler con una escala de sensibilidad adecuada a la carga máxima esperable. El control de velocidad de carga se realiza mediante control de la velocidad de descenso del pistón del gato correspondiente a 0,01 mm/s.

Figura 4.9 Medida del deslizamiento en barra (izquierda) o lámina (derecha).

Al haber reforzado cada viga con dos valores dispares de longitud adherida en cada uno de los bloques, el fallo adherente se produce siempre en primer lugar en el bloque con menor longitud de adherencia impuesta (L_{b1}). Una vez producido el primer deslizamiento, el dispositivo de fijación situado al final de la barra o lámina de FRP ancla el extremo de ésta que ha deslizado y permite que se produzca el deslizamiento de la segunda longitud de adherencia implementada (L_{b2}) al continuar el proceso de carga.

La configuración del ensayo permite controlar el deslizamiento de ambos bloques separadamente. De esta manera es posible obtener dos relaciones de carga-desplazamiento para cada viga ensayada. Los deslizamientos de los extremos medidos por captadores LVDT sujetos a las mordazas de los extremos, las bandas extensométricas en las barras/láminas, en su caso, así como la carga aplicada se registraron de forma continua mediante un *data-logger*.

4.7. Resultados

Todos los ensayos siguieron esencialmente el mismo patrón de comportamiento. En los primeros estadios al ir aumentando la carga aplicada no se aprecia a la vista deslizamiento de la barra/lámina hasta que se llega a una carga para la que, de forma rápida, se produce el deslizamiento de la barra/lámina en el bloque con menor longitud de adherencia con un descenso muy brusco de la carga transmitida, que puede llegar a cero por un instante debido al modo en que se controla la aplicación de la carga (a una velocidad constante de descenso del pistón).

A continuación, con unos niveles de carga aplicada muy inferiores a la máxima alcanzada, se sigue produciendo el deslizamiento en ese bloque hasta que llega a entrar en funcionamiento el sistema de anclaje. A partir de ese punto vuelve a incrementarse la carga aplicada en la viga hasta que se produce de forma similar el fallo de la adherencia en el segundo bloque (el de mayor longitud de adherencia), vuelve a bajar la carga aplicada y continua el deslizamiento de la barra/lámina hasta

que se detiene el ensayo por agotamiento del sistema. En la Figura 4.10 se representa una curva tipo carga total aplicada-tiempo.

Figura 4.10 Curva carga-tiempo tipo característica.

En las Tabla 4.3 a Tabla 4.8 se indican el modo de fallo observado en cada uno de los ensayos. En la mayoría de los casos el fallo se produce por deslizamiento de la barra o lámina en la interfase con el adhesivo epoxi (en la tabla B/E o L/E, para barras o láminas). En algunos casos el fallo se produjo por la rotura del hormigón antes del fallo adherente (en la tabla FH) y en un único caso el deslizamiento se produjo en la interfase del hormigón con el adhesivo (E/H). En la Figura 4.11 se presentan imágenes representativas de los tres tipos de fallo.

Figura 4.11 a) Fallo de adherencia por deslizamiento barra-adhesivo, b) fallo adhesivo-hormigón c) rotura del hormigón.

En la Figura 4.12 se representan las curvas tensión de adherencia-deslizamiento de cada barra y lámina. Cada curva se ha obtenido como media de los dos o tres captadores situados en los extremos de las vigas (dos y tres captadores en las láminas y tres en las barras) y se han agrupado las curvas en función de la longitud de adherencia considerada y tipo de FRP. Con objeto de apreciar el comportamiento en las fases iniciales del deslizamiento se ha cortado la representación de las curvas una

vez que se llega a un deslizamiento continuo sin variación sensible de la carga aplicada.

a) Barras, longitud de adherencia 48 mm.

b) Láminas, longitud de adherencia 48 mm.

c) Barras, longitud de adherencia 96 mm.

d) Láminas, longitud de adherencia 96 mm.

e) Barras, longitud de adherencia 144 mm.

f) Láminas, longitud de adherencia 144 mm.

Figura 4.12 Curvas tensión de adherencia-deslizamiento agrupadas por barras o láminas y longitudes de adherencia

Los resultados experimentales alcanzados para cada tipo de refuerzo (barra o lámina) y longitud de adherencia se dan en las Tabla 4.3 a Tabla 4.8. En ellas se incluye: la longitud de adherencia considerada, la resistencia del hormigón a compresión (f_{cm}), la carga máxima hasta alcanzar el deslizamiento, la tensión correspondiente de adherencia y el modo de fallo. También se indica, para cada longitud de adherencia considerada, los valores medios y el coeficiente de variación de la carga de despegue y la tensión de adherencia máxima.

Longitud de adherencia [mm]	BARRA			
	f_{cm} [MPa]	Carga máxima [kN]	Tensión de adherencia [MPa]	Modo de fallo
48	26,26	18,02	14,93	B/E
	26,26	18,94	15,70	B/E
	26,26	18,91	15,68	B/E
	26,26	19,70	16,33	B/E
	18,58	15,71	13,02	B/E
	18,58	15,64	12,96	B/E
	22,48	17,54	14,54	B/E
	18,58	20,54	17,02	B/E
	22,48	17,66	14,64	B/E
	17,94	16,98	14,08	B/E
	17,94	16,94	14,04	B/E
	22,48	14,47	12,00	B/E
	17,94	17,00	14,09	B/E
	22,48	15,78	13,08	B/E
	27,35	14,85	12,31	B/E
	27,35	16,21	13,44	B/E
Media		17,18	14,24	
CV [%]		10,09		

Tabla 4.3 Tensión de adherencia para barra. Longitud adherida 48 mm.

Longitud de adherencia [mm]	BARRA			
	f_{cm} [MPa]	Carga máxima [kN]	Tensión de adherencia [MPa]	Modo de fallo
96	26,26	29,33	12,16	B/E
	18,58	25,44	10,54	B/E
	18,58	23,15	9,59	B/E
	22,48	24,61	10,20	B/E
	17,94	27,12	11,24	B/E
	17,94	28,01	11,61	B/E
	22,48	24,09	9,99	B/E
	18,58	22,57	9,35	FH
	27,35	27,66	11,46	B/E
Media		25,78	10,68	
CV [%]		9,15		

Tabla 4.4 Tensión de adherencia para barra. Longitud adherida 96 mm.

Longitud de adherencia [mm]	BARRA			
	f_{cm} [MPa]	Carga máxima [kN]	Tensión de adherencia [MPa]	Modo de fallo
144	26,26	35,96	9,94	B/E
	22,48	35,94	9,93	B/E
	18,58	33,04	9,13	B/E
	17,94	35,27	9,75	B/E
	18,58	30,57	8,45	FH
	22,48	34,55	9,55	B/E
	27,35	33,11	9,15	B/E
Media		34,06	9,41	
CV [%]		5,74		

Tabla 4.5 Tensión de adherencia para barra. Longitud adherida 144 mm.

Longitud de adherencia [mm]	LÁMINA			
	f_{cm} [MPa]	Carga máxima [kN]	Tensión de adherencia [MPa]	Modo de fallo
48	22,48	21,01	12,51	L/E
	18,58	19,27	11,47	L/E
	18,58	17,94	10,68	L/E
	22,48	19,96	11,88	L/E
	22,48	21,96	13,07	L/E
	18,58	13,44	5,96	E/H*
Media		20,03	11,92	
CV [%]		7,75		

* No considerado en el valor medio.

Tabla 4.6 Tensión de adherencia para lámina. Longitud adherida 48 mm.

Longitud de adherencia [mm]	LÁMINA			
	f_{cm} [MPa]	Carga máxima [kN]	Tensión de adherencia [MPa]	Modo de fallo
96	22,48	28,82	8,58	L/E
	18,58	24,00	7,14	L/E
	18,58	27,88	8,30	L/E
	22,48	21,68	6,45	L/E
	17,94	24,72	7,36	FH
	18,58	25,11	7,47	FH
Media		25,37	7,55	
CV [%]		10,31		

Tabla 4.7 Tensión de adherencia para lámina. Longitud adherida 96 mm.

Longitud de adherencia [mm]	LÁMINA			
	f_{cm} [MPa]	Carga máxima [kN]	Tensión de adherencia [MPa]	Modo de fallo
144	22,48	24,12	4,79	L/E
	17,94	32,75	6,50	L/E-FH
	18,58	25,09	4,98	L/E
	22,48	32,22	6,39	L/E
	22,48	33,04	6,55	L/E
	18,58	23,31	4,62	L/E
Media		28,42	5,64	
CV [%]		16,52		

Tabla 4.8 Tensión de adherencia para lámina. Longitud adherida 144 mm.

Respecto a los modos de fallo indicar que para longitudes pequeñas (48 mm) el fallo es siempre en la interfase entre la barra o lámina y el adhesivo epoxi (B/E o L/E), salvo en un caso en que se produce el fallo por deslizamiento en la interfase epoxi/hormigón (E/H). En este caso la carga de fallo es sensiblemente inferior a la alcanzada en las vigas semejantes, y se considera que pudo deberse a un defecto de ejecución del refuerzo, por lo que este resultado se ha excluido de los valores medios dados.

El fallo en el hormigón (FH) se produce en un caso para barra con longitud media (96 mm) y otro para longitud máxima (144 mm). En el caso de láminas, hay dos casos para longitudes de 96 mm y uno para longitud de 144 mm. Todos estos casos se producen con los hormigones de resistencia menor (17,94 o 18,58 MPa).

En la Tabla 4.9 se resumen los valores medios (coeficientes de variación) de los resultados obtenidos para barras y láminas para cada longitud de adherencia, indicándose los valores de las cargas de arrancamiento en kN, y la tensión de adherencia media que esta carga produce en la barra/lámina en MPa y el coeficiente de variación (igual en ambos casos) en %.

Longitud de adherencia [mm]	BARRA		LÁMINA	
	Carga [kN]	Tensión [MPa]	Carga [kN]	Tensión [MPa]
48	17,18 (10,09%)	14,24	20,03 (7,75%)	11,92
96	25,78 (9,15%)	10,68	25,37 (10,31%)	7,55
144	34,06 (5,74%)	9,41	28,42 (16,52%)	5,64

Tabla 4.9 Tensión de adherencia barra – lámina.

Se aprecia en la tabla que la carga de pérdida de adherencia aumenta con la longitud adherida, a la vez que disminuye la tensión media de adherencia. Comparando ambos tipos de refuerzo para una misma longitud, la tensión de adherencia media es siempre menor en la lámina (la superficie adherida es un 40% mayor), aunque la carga de pull-out es similar. El coeficiente de variación varía en todos los casos entre el 6 y el 16%. En el caso de las barras el coeficiente de variación disminuye con la longitud adherida, pero sin embargo en las láminas aumenta con ésta.

En la Figura 4.13 se representan para las láminas y para las barras los valores medios de la fuerza máxima de arrancamiento y de la tensión máxima de adherencia correspondiente para longitudes de adherencia de 48, 96 y 144 mm.

Figura 4.13 Representación de los valores medios de las fuerzas de arrancamiento y tensiones medias de adherencia de barras y láminas para las distintas longitudes de anclaje.

En la Figura 4.14 se representan las mediciones de las bandas extensométricas colocadas en la viga B(48-96), una en el centro entre los dos bloques y otra en el centro de la zona de adherencia mayor de uno de los bloques, con relación a la carga aplicada. También se representan los valores que se obtendrían considerando las fórmulas 4.1 y 4.2 para la obtención de las deformaciones en el centro de la viga.

Figura 4.14 Deformaciones medidas por las bandas en el centro de la viga y en el centro de la zona de adherencia y obtenidos según la fórmula 4.2.

Como se puede apreciar en la Figura 4.14, la deformación medida por la banda situada en el centro de la viga aumenta de manera lineal con la carga y coincide con la deformación teórica calculada a través de las ecuaciones 4.1 y 4.2. Para ambas bandas puede apreciarse la pérdida repentina de carga y deformación como consecuencia del primer deslizamiento de la barra. El segundo deslizamiento también se produce de forma repentina, y la deformación máxima de la banda situada en el centro de la zona adherida en el momento del fallo alcanza las 2400 $\mu\epsilon$ aproximadamente. El comportamiento de las bandas en el resto de las vigas instrumentadas es totalmente similar.

4.8. Conclusiones de los ensayos de adherencia

Los ensayos de adherencia realizados sobre barras y láminas de CFRP mediante la disposición de ensayo en viga, *beam test*, han permitido obtener valores de tensión de adherencia de rotura para estos elementos para distintas longitudes totales adheridas. En la mayoría de los casos el fallo se produce por deslizamiento de la barra o lámina en la interfase barra-adhesivo.

Se aprecia un mejor comportamiento de las láminas frente a las barras ya que, teniendo una sección neta menor, consiguen unas fuerzas de arrancamiento similares para la longitud de anclaje intermedia y la longitud de adherencia mayor, y una fuerza superior para la menor de las longitudes de adherencia. Sin embargo, el empleo de láminas requiere una mayor profundidad de las ranuras, por lo que en aplicaciones prácticas no siempre es posible su utilización por no existir un recubrimiento de hormigón suficiente.

Igualmente se ve que la tensión media de rotura por adherencia depende del tipo de elemento de refuerzo empleado (barra o lámina) y disminuye con la longitud total adherida. Los resultados obtenidos permiten mediante interpolación estimar una tensión media de rotura por adherencia para cualquier longitud de adherencia entre 48 y 144 mm.

Aunque el número de ensayos no es elevado y dada la limitada variabilidad en los valores para cada longitud de adherencia, se pueden considerar los valores medios obtenidos como representativos de los valores de adherencia. Hay que tener en cuenta que estos valores son representativos únicamente del tipo de barra/lámina y adhesivos empleados en este estudio. En todo caso, estos valores se podrán utilizar para el estudio de la capacidad a esfuerzo cortante del refuerzo de vigas hormigón armado con barras o láminas de CFRP que se presenta en el siguiente capítulo de esta tesis doctoral.

CAPÍTULO 5

ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL REFUERZO A CORTANTE DE VIGAS MEDIANTE NSM FRP

5.1. Introducción

La resistencia a esfuerzos de cortadura de vigas de hormigón armado con o sin armadura transversal ha sido ampliamente estudiada a través de numerosos trabajos de investigación iniciados a comienzos del siglo pasado. Sin embargo, debido a la complejidad que encierra en su conjunto el proceso, no se ha llegado aún a un modelo de cálculo universalmente aceptado que describa con precisión la totalidad de los mecanismos de resistencia actuantes.

En el refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado con NSM FRP, las investigaciones realizadas hasta la fecha son aún limitadas si se comparan con otras modalidades de refuerzo con FRP como el pegado externo (EB), y más aún si se comparan con las investigaciones realizadas sobre la propia resistencia a cortante de vigas de hormigón armado sin refuerzo externo. La dificultad añadida que supone la presencia del refuerzo externo de NSM FRP, junto con el número importante de variables y parámetros que influyen en la resistencia, hace necesario contar con un mayor número de datos experimentales que permitan profundizar en el entendimiento de los distintos mecanismos de resistencia presentes para el caso de una viga reforzada mediante NSM FRP. Con este objetivo se plantea en esta tesis la realización de un programa de ensayos dirigido principalmente a la evaluación de la resistencia a esfuerzos de cortadura de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortante mediante NSM FRP. Para ello se han empleado los dos mismos tipos de refuerzo (barra y lámina) utilizados en los ensayos de adherencia descritos en el

capítulo anterior. Ambos están formados por fibra de carbono embebida en resina epoxi, y son los dos elementos más utilizados en aplicaciones prácticas de NSM en la actualidad.

5.2. Programa experimental

El programa experimental desarrollado comprende el diseño, fabricación y ensayo de un total de diecisiete vigas de hormigón armado de 3750 mm de longitud y una sección transversal de 200 x 350 mm². Una de las vigas se ensaya como viga patrón sin refuerzo externo, y las dieciséis vigas restantes se refuerzan frente a esfuerzos de cortadura mediante barras o láminas de fibra de carbono (CFRP) insertadas en el recubrimiento de hormigón (NSM). Sobre cada viga se realizan dos ensayos de disposición similar: flexión en tres puntos asimétricos con luz de cortante igual a tres cantos útiles, tal y como se describirá con mayor detalle en el apartado 5.6 (Figura 5.13). En el estudio experimental se consideran las siguientes variables:

- El tipo de refuerzo de NSM FRP instalado: barra o lámina de CFRP.
- La orientación del refuerzo respecto al eje longitudinal de la viga: refuerzo vertical (a 90°) o con una inclinación de 45° de manera que cosan transversalmente la fisuración de cortante.
- La cuantía de refuerzo o separación entre elementos de refuerzo externo: 115 o 230 mm. La separación entre los cercos de la armadura interna es de 230 mm.

La combinación de estas variables da lugar a un total de ocho tipos de refuerzo a cortadura. Para cada uno de los tipos se han fabricado dos vigas, y con cada viga se realizan dos ensayos, de manera que en total se han realizado 32 ensayos en viga reforzada y 2 ensayos en viga patrón sin refuerzo externo. En la Tabla 4.1 se resume el programa experimental desarrollado y se introduce simultáneamente la nomenclatura utilizada para identificar cada ensayo. Cada viga se identifica a través de una letra inicial (B o L) que indica el tipo de refuerzo empleado en cada caso (Barra o Lámina de CFRP) seguida a continuación de la orientación del refuerzo de NSM FRP respecto al eje longitudinal de la viga (45 o 90°) y el número de barras o láminas de CFRP utilizadas en cada caso (3 o 6) en relación con el espaciamiento entre los elementos de refuerzo de NSM FRP impuesto (230 o 115 mm respectivamente). Finalmente, aunque aquí no se muestra explícitamente, se indica el orden de la viga de ensayo dentro de un mismo esquema de refuerzo (letra a o b) y si se trata de un ensayo realizado sobre vano largo (letra L) o vano corto (letra S) en correspondencia a los dos ensayos realizados por cada viga. A modo de ejemplo, en el espécimen de ensayo identificado como L45-3b(S), el tipo de refuerzo empleado es lámina (letra

inicial L), éste se encuentra orientado a 45° respecto al eje longitudinal de la viga y se han instalado 3 láminas de CFRP en cada una de las caras laterales de la misma y en ambos extremos, que corresponden a un espaciamiento entre elementos de refuerzo de 230 mm. Esta viga es la segunda ensayada dentro de esta tipología de refuerzo (letra b) y se trata de un ensayo de vano corto (letra S).

Viga	Tipo de refuerzo	Orientación del FRP [°]	Espaciamiento [mm]	Nº de Vigas
Referencia	-	-	-	1
B90-3	Barra	90	230	2
B90-6	Barra	90	115	2
B45-3	Barra	45	230	2
B45-6	Barra	45	115	2
L90-3	Lámina	90	230	2
L90-6	Lámina	90	115	2
L45-3	Lámina	45	230	2
L45-6	Lámina	45	115	2

Tabla 5.1 Programa experimental de ensayos sobre el refuerzo a cortante con NSM FRP.

En la Figura 5.1 se muestran esquemáticamente las configuraciones y la localización de los elementos de refuerzo (barras o láminas).

Figura 5.1 Programa experimental. Configuraciones de refuerzo a cortante con NSM FRP.

5.3. Descripción y fabricación de las vigas

Las vigas de hormigón armado empleadas en el estudio experimental poseen una longitud total de 3750 mm y una sección rectangular de 200 mm de ancho por 350 mm de canto. La armadura interna de acero se adopta de tal forma que asegure que el fallo final de la viga reforzada mediante NSM FRP se produce por esfuerzo cortante a pesar del refuerzo externo realizado. El armado longitudinal de tracción y compresión de la viga se compone, respectivamente, por cuatro y dos redondos de acero de tipo B500S de 20 mm de diámetro distribuidos tal y como se indica esquemáticamente en la Figura 5.2. El armado transversal lo conforman cercos de acero de tipo B400S de 6 mm de diámetro con una separación uniforme de 230 mm (Figura 5.2). El recubrimiento de hormigón en las cuatro caras de la viga es de 24 mm.

Figura 5.2 Geometría y armado de las vigas en el refuerzo a cortante con NSM FRP.

El proceso de fabricación de las vigas empleadas en el estudio comienza con la instrumentación del armado de éstas (Figura 5.3). Cada armadura se instrumenta con bandas extensométricas instaladas en los cercos de acero situados dentro de la luz de cortante en ambos extremos de la viga. Las bandas se instalan a media altura en cada una de las ramas verticales que conforman los cercos (Figura 5.4).

Figura 5.3 Armadura de las vigas.

Figura 5.4 Localización de la instrumentación en los cercos.

Para la correcta adhesión de la banda extensométrica en primer lugar se retira el óxido presente en la zona de unión con ayuda de un cepillo metálico circular colocado en un taladro eléctrico (Figura 5.5). A continuación, se limpia la superficie libre de óxido con alcohol y se adhiere la banda sobre la superficie del cerco limpio y seco en el espacio libre disponible entre las corrugas. Finalmente, la banda se protege frente a la humedad y los golpes accidentales que pudieran producirse durante la posterior fase de hormigonado.

Figura 5.5 Instrumentación de la armadura de las vigas.

Una vez completada la instrumentación de las armaduras de acero se procede al hormigonado de las vigas (Figura 5.6 y Figura 5.7). Durante esta fase la atención se centra en garantizar el recubrimiento de hormigón deseado que permita con posterioridad la realización de las ranuras características del refuerzo mediante NSM FRP sin dañar el armado de las vigas. Para ello se hacen uso de separadores plásticos de tipo rueda distribuidos a lo largo de toda la armadura.

El hormigonado de las vigas se realiza por parejas empleando un hormigón de central de tipo HA-25. El control de la resistencia final del hormigón vertido en cada caso se realiza a través de tres probetas cilíndricas de dimensiones normalizadas 150 x 300 mm² obtenidas durante cada fase de hormigonado (Figura 5.8).

Durante el vertido del hormigón en los moldes se realiza un vibrado del mismo para evitar oquedades y conseguir una distribución uniforme de la mezcla. Concluido el hormigonado de las vigas, éstas se desmoldan transcurridos un par de días y se almacenan junto con sus correspondientes probetas testigo bajo las mismas condiciones de humedad y temperatura hasta el comienzo de la fase de refuerzo.

Figura 5.6 Hormigonado de las vigas.

Figura 5.7 Moldes empleados para la fabricación de las vigas.

Figura 5.8 Hormigonado de las probetas testigo.

5.4. Disposición y geometría de las ranuras de NSM

Las dimensiones de las ranuras realizadas así como la disposición de éstas sobre las caras laterales de la viga se toman en concordancia con las recomendaciones de diseño publicadas sobre la materia y los trabajos de investigación existentes en la bibliografía sobre el refuerzo a cortante con NSM FRP (De Lorenzis and Teng, 2007). Con todo ello, y teniendo en cuenta los esquemas de refuerzo con NSM FRP prefijados en el programa de ensayos y las características geométricas del refuerzo de FRP empleado, se fija una profundidad de ranura de 20 mm para los dos tipos de refuerzo considerados (barra y lámina de CFRP) y un ancho de 12 mm para las barras, y de 7 mm para las láminas (Figura 5.9).

Adicionalmente, la ranura no ocupa todo el canto de la viga, sino que queda una separación de 50 mm entre el extremo del refuerzo externo y la cara superior de la

viga, con objeto de simular una situación real de refuerzo en la que la zona comprimida no suele ser accesible, y además evitar la mejora que introducirían los esfuerzos de compresión en el anclaje del refuerzo.

Figura 5.9 Dimensiones de las ranuras.

5.5. Refuerzo de las vigas con NSM FRP

Transcurridos al menos veintiocho días desde el hormigonado de las vigas se comienza el refuerzo externo de las mismas mediante NSM FRP. En primer lugar, se realizan las ranuras correspondientes a cada esquema de refuerzo mediante una rozadora. Seguidamente se elimina manualmente con ayuda de un cincel el saliente de hormigón generado durante el corte, así como las pequeñas protuberancias que pudieran existir en la superficie de la ranura como consecuencia del mecanizado de éstas. Finalmente se limpia la superficie de polvo y suciedad mediante aire comprimido y se procede a continuación a ejecutar el refuerzo de la viga propiamente dicho.

Figura 5.10 Ejecución de ranuras en las caras laterales de las vigas.

Para el refuerzo externo mediante NSM FRP se emplean barras y láminas de fibra de carbono unidireccional embebida en matriz epoxi. Ambos tipos de refuerzo se fabrican por pultrusión y tienen un contenido de fibra de carbono de aproximadamente el 65%. Se trata de los mismos refuerzos utilizados en los ensayos de adherencia presentados en el capítulo anterior. Su acabado es prácticamente liso, con una ligera rugosidad superficial (Figura 4.3). En cuanto a sus propiedades mecánicas, de acuerdo a los

datos suministrados por el fabricante (ver Tabla 4.2), ambos refuerzos presentan un módulo de elasticidad medio de 165 GPa, una resistencia a tracción media de 2500 MPa y una deformación de rotura del 1,5%. Las barras, de denominación comercial *MBrace MBar 165/2500*, poseen un diámetro nominal de 8 mm mientras que las láminas, de denominación comercial *MBrace Cut-In*, presentan una sección rectangular de 2,5 x 15 mm². El área de la sección transversal es un 34% superior en las barras que en las láminas.

Antes de proceder al refuerzo las barras y láminas se cortan en las dimensiones requeridas, se les retira el plástico protector que las envuelve y se instrumentan pegando una banda extensométrica sobre su superficie, tal como se muestra en la Figura 5.11.

Figura 5.11 Instrumentación de los refuerzos de CFRP.

Las barras y láminas de CFRP se insertan en el recubrimiento de hormigón de la viga a través de las ranuras mecanizadas previamente en la superficie de la viga, y se adhieren a ésta a través de un adhesivo de tipo epoxi *MBrace Laminate Adhesive HT* para el caso de las barras, y *Masterflow 920 SF* para el caso de las láminas. Estos adhesivos empleados en cada caso se utilizan de acuerdo a las recomendaciones dadas por el fabricante.

El adhesivo utilizado con las barras se emplea habitualmente para el refuerzo con laminados pegados externamente, mientras que para el refuerzo con láminas se empleó un adhesivo para anclajes estructurales que se aplica con pistola y permite una más fácil colocación en las rozas de las láminas que son más estrechas.

Para el refuerzo con barra se aplica en primer lugar sobre la superficie de la ranura, y con ayuda de una pequeña brocha, una capa de adhesivo base o imprimación como paso previo a la aplicación del adhesivo epoxi empleado en el refuerzo con NSM FRP. La finalidad básica de este adhesivo base de baja viscosidad es el sellado de poros en la superficie de hormigón y posterior mejora del comportamiento adherente del adhesivo epoxi utilizado. El tiempo de secado de esta capa de imprimación varía en

función de las condiciones de humedad y temperatura ambiente, estableciéndose de acuerdo a las especificaciones del producto un tiempo mínimo de 90 minutos y un máximo de 48 horas.

Una vez seca la capa de imprimación aplicada previamente, se rellena con ayuda de una espátula las tres cuartas partes de cada ranura realizada con el adhesivo y se introducen a continuación las barras de refuerzo presionando ligeramente éstas hasta la posición deseada y permitiendo que el adhesivo fluya alrededor de las mismas. Finalmente se añade más adhesivo sobre las ranuras hasta completar éstas y se elimina el adhesivo sobrante.

Para las vigas reforzadas con láminas, el adhesivo empleado en este caso no requiere de imprimación previa y la aplicación del mismo se realiza directamente con ayuda de una pistola aplicadora. La secuencia de aplicación del adhesivo e instalación de la lámina es la misma que la indicada anteriormente para barra.

El curado del adhesivo se produce a temperatura ambiente, y se dejan transcurrir al menos siete días desde la ejecución del refuerzo hasta que se procede al ensayo de la viga.

Figura 5.12 Proceso de refuerzo de una viga.

5.6. Descripción de los ensayos e instrumentación

El comportamiento del refuerzo externo a cortante mediante NSM FRP en vigas de hormigón armado es evaluado a través de dos ensayos correlativos de flexión en tres puntos, tal como se muestra en la Figura 5.13 y Figura 5.14. Sobre cada una de las vigas anteriormente descritas se realiza un total de dos ensayos de flexión no simétricos equivalentes. La luz de cortante en cada uno de los ensayos es de 930 mm (tres veces el canto útil de la viga) y la distancia entre apoyos es de 3500 mm para el

primer ensayo (configuración de viga larga) y de 2570 mm para el segundo ensayo (configuración de viga corta).

Figura 5.13 Configuración de los ensayos en el refuerzo a cortante con NSM FRP.

En primer lugar, con una distancia entre apoyos de 3500 mm, se aplica una carga puntual (P_L) a una distancia de 930 mm medidos desde uno de los apoyos y se lleva la viga hasta rotura bajo control en desplazamiento. Una vez alcanzada la rotura por cortante en el extremo de la viga cargado, se realiza un segundo ensayo sobre la misma viga desplazando el apoyo próximo a la zona de fallo a la vertical del anterior punto de carga, se reubica el punto de aplicación de la carga (P_S) a la misma distancia indicada anteriormente pero ahora medida desde el apoyo opuesto, y se lleva nuevamente la viga hasta rotura. Mediante este procedimiento se obtiene dos ensayos equivalentes por cada una de las vigas analizadas.

Figura 5.14 Configuración de los dos ensayos realizados sobre cada viga.

En cuanto a la instrumentación implementada, cada viga está provista en sus extremos de bandas extensométricas instaladas en los cercos de acero ubicados dentro de la luz de cortante formada como consecuencia del procedimiento de ensayo seguido (una banda pegada a media altura en ambas ramas verticales de los cercos). En el refuerzo de FRP también se instalan bandas extensométricas cuya posición varía ligeramente en función del esquema de refuerzo considerado, aunque en general se toma de forma que la posición de éstas coincida en al menos una de las caras con

la posición de las bandas instaladas en los cercos con objeto de determinar la interacción existente entre el refuerzo externo de FRP y los cercos de acero en la resistencia a cortadura de la viga. En la Figura 5.15 se representa la disposición de las bandas extensométricas para cada esquema de refuerzo (en color negro bandas en cercos de acero y en rojo bandas en FRP). Los datos obtenidos de cada ensayo se componen por tanto de las medidas de carga y deformación en cercos y FRP junto con el valor de desplazamiento obtenido en el centro de vano a través de un captador lineal de desplazamientos (LVDT).

Figura 5.15 Instrumentación en el refuerzo a cortante con NSM FRP.

5.7. Resultados

En la siguiente sección se presentan los principales resultados obtenidos en el estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortadura mediante NSM FRP.

5.7.1. Esfuerzo cortante de rotura

La resistencia a cortante obtenida experimentalmente para cada tipo de refuerzo considerado se representa en la Tabla 5.2. Para cada una de las vigas ensayadas se indica: la resistencia a compresión media del hormigón (f_{cm}) empleado en cada caso; el valor del esfuerzo cortante de rotura para el ensayo de vano largo, corto y la media entre ambos resultados; a continuación se muestra el incremento de resistencia sobre

el cortante de rotura de cada configuración de refuerzo, tomado éste como media de los ensayos realizados sobre una misma tipología de refuerzo y respecto al cortante de rotura de la viga de control (sin refuerzo externo) homogenizado en base a la diferente resistencia del hormigón utilizado en cada caso. Finalmente se indica el modo de fallo característico de cada tipo de refuerzo y para la disposición de vano largo (L) y corto (S). En cuanto a los modos de fallo: la letra C representa el fallo a cortadura debido al avance de una o varias fisuras; las letras SC indican la separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo; y finalmente las letras DL indican el fallo por desprendimiento del recubrimiento lateral de hormigón. Como se puede ver en la Tabla 5.2, en una misma viga se pueden dar roturas que comparten varios tipos de fallo.

Viga	f_{cm} [MPa]	Cortante de rotura [kN]			$\frac{V_{FRP}}{V_{REF}}$	Modo de fallo	
		V. Larga (L)	V. Corta (S)	Valor medio		V. Larga (L)	V. Corta (S)
Referencia	27,97	104,76	123,17	113,97	-	C	C
B90-3a	22,84	103,81	131,22	117,52	1,08	C	C
B90-3b	26,02	114,60	120,56	117,58		C	C
B90-6a	26,69	160,06	180,98	170,52	1,51	C	C
B90-6b	24,09	164,90	161,97	163,44		C	C
B45-3a	29,11	177,68	133,64*	177,68	1,64	C+DL	C
B45-3b	23,91	183,48	194,90	189,19		C+SC+DL	C+SC+DL
B45-6a	22,98	173,20	188,77	180,99	1,78	C+SC	C+SC
B45-6b	28,48	232,67	193,05	212,86		C	C
L90-3a	22,84	111,08	123,05	117,07	1,14	C	C
L90-3b	26,02	124,59	138,75	131,67		C	C
L90-6a	26,69	177,24	198,79	188,02	1,52	C	C+SC
L90-6b	24,09	137,07	157,63	147,35		C	C
L45-3a	29,11	172,83	174,29	173,56	1,70	C+SC+DL	C+SC
L45-3b	23,91	209,03	203,39	206,21		C+SC	C
L45-6a	22,98	180,91	186,73	183,82	1,82	C+SC	C+SC+DL
L45-6b	28,48	225,99	216,02	221,01		C+SC+DL	C+DL
Promedio:	25,66	161,99	166,29	164,14	-	-	-

* No considerado en el valor medio (fallo anómalo).

Tabla 5.2 Resultados experimentales cortante.

En base a los resultados indicados (Tabla 5.2), los valores de resistencia a cortante alcanzados en una misma viga, en el ensayo de vano largo y vano corto, difieren de su

valor medio como máximo un 14% aproximadamente, aunque en general, para la amplia mayoría de los casos, esta diferencia no supera el 9% a favor de uno u otro caso. Sin embargo, las medias de los valores obtenidos en todos los ensayos de viga larga o corta difieren de su valor medio en tan sólo un 2% aproximadamente, es decir, que las diferencias obtenidas para cada configuración de ensayo corresponden a la aleatoriedad intrínseca de los propios ensayos y no son atribuibles al tipo de ensayo largo o corto. Por lo tanto, es posible indicar el incremento de resistencia V_{FRP}/V_{REF} obtenido para cada tipología de refuerzo como media de los valores en las dos vigas con idéntica tipología de refuerzo y los dos ensayos sobre cada una de ellas.

Para calcular el incremento de resistencia para cada configuración de refuerzo respecto a la viga de referencia se resta del total obtenido en el ensayo, el alcanzado por la viga de control teniendo en cuenta la diferencia de resistencia de los hormigones empleados en ambos casos. Para ello, se multiplica en cada caso el cortante obtenido en la viga de referencia por el factor $(f_{cm,x}/f_{cm,ref})^{1/3}$ donde el término $f_{cm,x}$ es la resistencia del hormigón en el ensayo considerado y $f_{cm,ref}$ es la resistencia del hormigón en la viga de referencia. Es decir, se evalúa la resistencia de la viga patrón como si su hormigón hubiese tenido la resistencia del de la viga con la que se compara. La expresión utilizada está basada en la propuesta para el cálculo del esfuerzo cortante indicada en la EHE (EHE, 2008) y Eurocódigo 2 (Eurocódigo-2, 2010).

Tal y como se observa en la Tabla 5.2, el incremento de resistencia obtenido para cada configuración de refuerzo varía entre un 8 y un 80% aproximadamente en función de la tipología de refuerzo. Se observa, a su vez, un comportamiento ligeramente mejor de las láminas frente a las barras (entre un 1 y un 6%), con una mayor superficie adherente (un 40% superior) y una menor sección (37,5 mm² frente a 50,3 mm²).

Respecto a la orientación de los elementos de refuerzo, en todos los casos se aprecia un mejor comportamiento de la configuración a 45° respecto a la de 90°, con incrementos de resistencia entre un 30 y un 50% superiores. Sin embargo, teniendo en cuenta que la longitud de los refuerzos a 45° es un 42% mayor, el incremento de resistencia logrado por unidad lineal de refuerzo es semejante en el caso de refuerzo con seis elementos. En el caso de refuerzo con tres elementos se mantiene el mejor comportamiento de la configuración a 45°.

En resumen, para tres barras o láminas orientadas a 90° el incremento de resistencia logrado gira en torno al 10%. Con seis elementos a 90° el incremento de resistencia gira alrededor del 50%. Para tres elementos orientados a 45° el incremento de resistencia gira en torno al 65%. Finalmente, la mayor resistencia alcanzada se obtiene para seis elementos orientados a 45° con un incremento de resistencia de hasta el 80%.

5.7.2. Esfuerzo cortante - desplazamiento

En la Figura 5.16 se representan conjuntamente todas las curvas de esfuerzo cortante frente al desplazamiento en el centro de vano obtenidas en los distintos ensayos realizados y distinguiendo entre vano largo (Figura 5.16 a), vano corto (Figura 5.16 b) y viga (a o b) con objeto de facilitar su representación gráfica. Tal y como ya se ha indicado, el refuerzo a cortante mediante NSM FRP proporciona un aumento del cortante de rotura respecto a la viga de referencia en la casi totalidad de los ensayos realizados incluso teniendo en cuenta que la resistencia del hormigón empleado en cada caso no es la misma en todas la vigas.

Se destaca en la figuras que el refuerzo a cortante mediante NSM FRP en cualquier cuantía apenas modifica la rigidez de la viga obteniéndose curvas con la misma pendiente hasta iniciarse los procesos de fisuración y rotura de las vigas.

(a) Curvas cortante-flecha (vano largo).

(b) Curvas cortante-flecha (vano corto).

Figura 5.16 Curvas cortante-desplazamiento en el refuerzo a cortante mediante NSM FRP.

5.7.3. Modos de fallo

El modo de fallo observado en todos los casos analizados fue por cortante como era de esperar. Sin embargo, pueden distinguirse tres tipos de fallo en función de la cuantía y orientación del refuerzo: fallo a cortadura debido al avance de una o varias

fisuras; fallo por separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo; y fallo por desprendimiento del recubrimiento lateral de la viga.

Tal y como se introducía previamente, el avance de las fisuras principales que provocan el fallo final de la viga se ve modificado por la orientación y cantidad de refuerzo externo de NSM FRP implementado, provocando los distintos modos de fallo indicados anteriormente o una combinación de éstos.

En general, durante el proceso de carga, las primeras fisuras generadas dentro de la luz de cortante frenan momentáneamente su avance una vez éstas alcanzan un elemento de refuerzo de NSM FRP. A medida que aumenta la carga aplicada, aparecen nuevas fisuras y se produce el avance de algunas de las fisuras generadas previamente durante las primeras etapas de carga.

El rasgo más característico del avance de las fisuras observadas es que éstas tratan de esquivar el refuerzo externo de NSM FRP, lo que provoca que el fallo final no sea debido al avance puro de una fisura característica de fallo a cortadura sino a una combinación, en mayor o menor medida, de los fallos generales indicados previamente. En casos extremos, la fisura esquiva la casi totalidad del refuerzo externo induciendo el modo de fallo por separación de la cabeza de hormigón. Adicionalmente, el fallo final de la viga puede venir acompañado de otros tipos de fallos complementarios como puede ser el desprendimiento del recubrimiento inferior de hormigón próximo a una esquina de la viga o la rotura de algún cerco.

Para los dos ensayos realizados sobre la viga de control (sin refuerzo externo), el fallo se produjo fundamentalmente por la progresión de una fisura principal de cortante que parte de un punto próximo al apoyo y avanza hacia el punto de aplicación de la carga (Figura 5.17). Esta fisura principal viene acompañada de un grupo reducido de fisuras que aparecen desde la cara inferior a distintas separaciones y progresan con ésta durante el proceso de carga de la viga, pero no alcanzan la magnitud de la fisura principal que provoca el fallo final de la misma.

Figura 5.17 Perfil de fisuración Referencia (S).

Para vigas reforzadas con 3 barras o láminas de CFRP orientadas a 90° (véase por ejemplo la Figura 5.18) el modo de fallo se caracteriza nuevamente por el avance de

una fisura principal que provoca el fallo final de la viga, junto con la aparición de otras fisuras de relativo menor tamaño que progresan con la fisura principal a menor ritmo. Sin embargo, como se indicaba con anterioridad, el avance de la fisura principal se ve alterado por la presencia del refuerzo externo de FRP, y provoca que la fisura trate de bordear el refuerzo, fundamentalmente durante las fases finales del ensayo. Este comportamiento es el que da origen en algunos casos, donde la fisura bordea la casi totalidad del FRP, al denominado fallo por separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo.

Figura 5.18 Perfil de fisuración B90-3a(S).

Para vigas reforzadas con 6 barras o láminas de CFRP orientadas a 90° (Figura 5.19) el modo de fallo observado es similar al indicado anteriormente para 3 elementos de refuerzo, es decir, el fallo se produce por el progreso de una fisura principal que trata de bordear durante su avance el refuerzo externo de NSM FRP instalado. La principal diferencia con el caso anterior es la posición a partir de la cual la fisura comienza a bordear el refuerzo externo, siendo en este caso en un elemento de refuerzo más cercano al apoyo, lo que provoca en algunos de los casos el fallo por separación de la cabeza de hormigón.

Figura 5.19 Perfil de fisuración L90-6b(L).

Para las vigas reforzadas con 3 barras o láminas de CFRP orientadas a 45° (véase por ejemplo la Figura 5.20), el fallo también se produce por el avance de una fisura principal, aunque en este caso viene acompañada de un número mayor de fisuras de menor magnitud. Para esta tipología de refuerzo también se observan otros modos de fallo adicionales como son la separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo y el fallo por desprendimiento del recubriendo lateral de hormigón.

Figura 5.20 Perfil de fisuración L45-3b(S).

Para vigas reforzadas con 6 barras o láminas y una orientación de 45° el modo de fallo característico es la separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo (Figura 5.21), y el desprendimiento del recubrimiento lateral de hormigón (Figura 5.22).

Figura 5.21 Perfil de fisuración L45-6a(L).

Figura 5.22 Perfil de fisuración L45-6b(L).

En resumen, y en base a la clasificación indicada anteriormente, los modos de fallo por desprendimiento del recubrimiento lateral de hormigón y la separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo aparecen principalmente para una orientación del FRP de 45° y seis barras o láminas de refuerzo. Para el resto de casos analizados, es decir, 45° con tres barras o láminas de refuerzo y 90° con ambas cuantías de refuerzo, el fallo dominante es la rotura de la viga debido al avance de una o varias fisuras combinado con otros tipos de fallo.

5.7.4. Deformación en cercos y FRP

A continuación se presentan las curvas de esfuerzo cortante y deformación en cercos de acero y FRP para algunas de las configuraciones de refuerzo analizadas en el programa experimental. El resto de curvas se muestran en el anejo final. Tal y como se indicó previamente en el apartado 5.6, se han instalado bandas extensométricas en los cercos ubicados dentro de la luz de cortante y en el refuerzo externo de FRP de manera que la posición de estas últimas coincida en al menos una de las caras con la posición de las bandas instaladas en los cercos (Figura 5.15). En aquellos casos en los que alguna de las bandas no haya registrado ninguna medida, la respectiva curva no aparece en el gráfico y su número se representa tachado en la leyenda.

Para la viga de referencia, en la Figura 5.23 se representan las medidas de deformación obtenidas en los cercos de acero para el ensayo de vano largo (L) y vano corto (S), y en la Figura 5.24 se representa el perfil de fisuración de dicha viga junto con los valores de carga del pistón registrados. Tal y como se ha indicado previamente, las bandas extensométricas se sitúan en ambas ramas verticales de los cercos situados dentro de la luz de cortante. En la Figura 5.23 se observa como dentro de un mismo cerco, las medidas de deformación de ambas bandas son parejas, comenzando ambas a medir deformación aproximadamente al mismo nivel de carga correspondiente al momento de aparición de una fisura que corta el respectivo cerco en las proximidades del punto de medida (Figura 5.24). De acuerdo a los niveles de deformación alcanzados durante el ensayo, todos los cercos han plastificado previamente al fallo final de la viga, y se registran valores de deformación máximos en torno a las 4000 $\mu\epsilon$ en la casi totalidad de los cercos.

Figura 5.23 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga Referencia.

Figura 5.24 Perfil de fisuras de la viga de referencia. Der. Vano largo (L) e Izq. Vano corto (S).

Para las vigas reforzadas externamente con NSM FRP, se representan en las Figura 5.25 a Figura 5.32 las medidas de deformación en cercos y FRP junto con los perfiles de fisuración de las vigas B90-3a(S), B45-3a(L), L90-3a(L) y L45-3a(S).

Para las vigas con refuerzo externo, las medidas de deformación en las dos ramas de un mismo cerco ya no son tan parejas como las que se obtenían en la viga de referencia (Figura 5.23), y no todos los cercos registran valores de deformación elevados en el momento del fallo.

Respecto a las deformaciones en el FRP, se observa que cada rama del cerco trabaja conjuntamente con el FRP próximo y ambos comienzan a medir deformaciones a niveles de carga similares como consecuencia de la aparición de una fisura cercana. Este comportamiento se mantiene hasta niveles de carga próximos a la rotura. En esta fase final pueden observarse en algunos casos cambios bruscos en las medidas registradas en función de la fragmentación de la viga en las zonas próximas a los puntos de medición según el modo de fallo.

En cuanto a los valores de deformación máximos registrados en el FRP, se aprecian en general valores de deformación inferiores para la orientación de 90° , no superándose en general las $3000 \mu\epsilon$ en la mayoría de las barras o láminas con esta orientación. Para el refuerzo a 45° se registran en cambio deformaciones máximas cercanas a las $4000 \mu\epsilon$.

Figura 5.25 Curvas cortante-deformación en cercos (izq.) y FRP (der.) en la viga B90-3a(S).

Figura 5.26 Perfil de fisuración de la viga B90-3a(S).

Figura 5.27 Curvas cortante-deformación cercos (izq.) y FRP (der.) en la viga B45-3a(L).

Figura 5.28 Perfil de fisuración de la viga B45-3a(L).

Figura 5.29 Curvas cortante-deformación cercos (izq.) y FRP (der.) en la viga L90-3a(L).

Figura 5.30 Perfil de fisuración de la viga L90-3a(L)

Figura 5.31 Curvas cortante-deformación cercos (izq.) y FRP (der.) en la viga L45-3a(S).

Figura 5.32 Perfil de fisuración de la viga L45-3a(S).

5.7.5. Aplicación del modelo de Rizzo y De Lorenzis a los resultados experimentales

Entre los modelos teóricos propuestos para la estimación de la contribución del refuerzo de NSM FRP a la resistencia a cortadura de vigas de hormigón armado, el modelo de Rizzo y De Lorenzis (Rizzo and De Lorenzis, 2009b) es en general el modelo de mayor aceptación por su sencilla formulación y facilidad de cálculo.

Como posible validación del modelo de Rizzo y De Lorenzis, se comparan los incrementos de resistencia a cortante obtenidos experimentalmente con los predichos por el modelo teórico indicado. Se consideran alternativamente tres posibles tensiones de adherencia.

En primer lugar, la obtenida por De Lorenzis en sus ensayos de adherencia y recogida en la guía de diseño y cálculo con FRP de la ACI (ACI-440.2R, 2008). Y en segundo y tercer lugar, la tensión de adherencia mínima obtenida para barra y lámina en los ensayos de adherencia (*beam test*) descritos en el capítulo anterior.

A continuación se describe un ejemplo ilustrativo del cálculo mediante el modelo de Rizzo y De Lorenzis, para seguidamente comparar los resultados experimentales obtenidos con el modelo

5.7.5.1. Ejemplo de cálculo del modelo de Rizzo y De Lorenzis

En el modelo de Rizzo y De Lorenzis (Rizzo and De Lorenzis, 2009b) se establece para el cálculo de la resistencia a cortante de una viga (V) la siguiente expresión:

$$V = V_C + V_S + V_{FRP} \quad 5.1$$

Donde V_C es la contribución a la resistencia a cortadura del hormigón, V_S es la resistencia aportada por la armadura de cortante y V_{FRP} es la contribución a la resistencia del refuerzo de NSM FRP implementado. El valor de V_C y V_S se calcula mediante la pertinente normativa de cálculo para el hormigón estructural.

Si se considera un caso real como el indicado en la Figura 5.33 correspondiente a la viga L45-3b(L) del programa experimental realizado, y en la que el fallo se produjo idealmente por el avance de una fisura con un ángulo aproximado de 45° , la resistencia V_{FRP} aportada por el NSM FRP puede calcularse de la siguiente manera:

$$V_{FRP} = 2(\sum l_{emb,i}) p \tau_f \sin \alpha \quad 5.2$$

donde el valor de $\sum l_{emb,i}$ se obtiene a partir de la suma de las dos longitudes de adherencia mínimas en las que queda dividida cada lámina de FRP al paso de la fisura de cortante que provoca el fallo ($\sum l_{emb,i} = l_1 + l_2$). τ_f es la tensión de adherencia

(prefijada de antemano), p es en este caso el perímetro de la lámina de FRP instalada como refuerzo (35 mm), y finalmente tomamos $\alpha = 45^\circ$.

Figura 5.33 Longitudes de adherencia para la viga L45-3b(L). Rizzo y De Lorenzis.

Si se considera finalmente una tensión de adherencia (τ_f) de 6,81 MPa y 5,64 MPa se obtiene un aporte del FRP (V_{FRP}) de 77,9 y 64,5 kN respectivamente.

5.7.5.2. Comparación de los resultados experimentales con los valores teóricos según el modelo de Rizzo y De Lorenzis

En la Tabla 5.3 se representa el cortante aportado por el FRP obtenido para cada tipología de refuerzo distinguiéndose entre el ensayo de vano largo y vano corto. Se indica a su vez el aporte medio del refuerzo obtenido en ambos casos (largo y corto) junto con el aporte medio del FRP para las dos vigas ensayadas dentro de una misma configuración de refuerzo.

A continuación se indica el cortante teórico aportado por el FRP obtenido mediante el Modelo de Rizzo y De Lorenzis para un ángulo de inclinación de fisura igual a 45° y para distintas tensiones de adherencia: en primer lugar para una tensión de adherencia tanto para barra como para lámina de 6,81 MPa; y seguidamente para las tensiones de adherencia mínimas obtenidas en los ensayos experimentales de adherencia descritos en el capítulo 4. Para las barras se emplea una tensión de adherencia de 9,41 MPa y para las láminas una tensión de adherencia de 5,64 MPa.

Finalmente se indica el modo de fallo característico de cada ensayo (C: fallo a cortadura debido al avance de una o varias fisuras; SC: fallo con separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo; y DL: fallo por desprendimiento del recubrimiento lateral de la viga).

Viga	Cortante aportado FRP [kN]			Rizzo&De Lorenzis [kN]		Experimental/Teórico		Modo de fallo		
	V. Larga (L)	V. Corta (S)	Valor medio	τ 6,81 MPa	τ_{barra} 9,41 MPa $\tau_{\text{lámina}}$ 5,64 MPa	τ 6,81 MPa	τ_{barra} 9,41 MPa $\tau_{\text{lámina}}$ 5,64 MPa	V. Larga (L)	V. Corta (S)	
B90-3a	6,3	17,2	11,8	9,1	10,3	14,2	0,89	0,64	C	C
B90-3b	12,6	0,3	6,5						C	C
B90-6a	57,8	60,7	59,2	58,5	49,6	68,6	1,18	0,85	C	C
B90-6b	68,6	47,1	57,8						C	C
B45-3a	70,6	8,7*	70,6	78,0	49,6	68,6	1,57	1,14	C+DL	C
B45-3b	88,6	82,2	85,4						C+SC+DL	C+SC+DL
B45-6a	80,2	78,4	79,3	88,4	99,3	137,2	0,89	0,64	C+SC	C+SC
B45-6b	126,5	68,7	97,6						C	C
L90-3a	14,1	8,5	11,3	16,1	14,3	11,8	1,13	1,36	C	C
L90-3b	22,9	19,0	20,9						C	C
L90-6a	75,3	78,7	77,0	59,0	69,1	57,2	0,85	1,03	C	C+SC
L90-6b	39,3	42,5	40,9						C	C
L45-3a	65,8	48,8	57,3	80,3	69,1	57,2	1,16	1,40	C+SC+DL	C+SC
L45-3b	115,5	91,1	103,3						C+SC	C
L45-6a	88,4	76,2	82,3	94,0	138,2	114,5	0,68	0,82	C+SC	C+SC+DL
L45-6b	119,9	91,6	105,7						C+SC+DL	C+DL

* No considerado en el valor medio (fallo anómalo).

Tabla 5.3 Incremento de resistencia a cortadura. Modelo de Rizzo y De Lorenzis.

Para calcular el cortante experimental aportado por el refuerzo externo se resta del total obtenido en el ensayo, el alcanzado por la viga de control, pero teniendo en cuenta la diferencia de resistencia de los hormigones empleados en ambas vigas, según la expresión que se ha indicado en el apartado 5.7.1.

Tal y como se observa en la Tabla 5.3, la aproximación del modelo de Rizzo y De Lorenzis a los resultados experimentales depende sensiblemente de la tipología de refuerzo implementada y del valor de la tensión de adherencia utilizada. Aunque en un primer momento cabría esperar resultados de carácter conservador, es decir, que subestimaran el aporte del refuerzo de FRP, se observa como los resultados teóricos alternativamente sobreestiman o subestiman los correspondientes resultados experimentales.

Tampoco se observa una relación clara entre el modo de fallo y la aproximación del modelo teórico a los resultados experimentales. En los casos en los que el fallo se produjo principalmente por el avance de una fisura de cortante (sin el desprendimiento del recubrimiento lateral de la viga o la separación de la cabeza de hormigón) cabría esperar que la pérdida de adherencia de los elementos de refuerzo constituyera la principal causa de fallo del refuerzo externo, sin embargo, no se aprecia un mejor ajuste entre los resultados experimentales y teóricos en estos casos.

La resistencia a cortante aportada por el FRP indicada por el modelo de Rizzo y De Lorenzis es linealmente proporcional a la tensión de adherencia que se adopte, pudiendo variar ésta en un rango de valores muy amplio. Para la utilización de este modelo en la comparación de los valores experimentales con los teóricos se han utilizado tres valores distintos: 6,81 MPa que es el valor propuesto por los autores; 9,41 MPa que es el valor medio obtenido en los ensayos de adherencia en esta tesis para la máxima longitud de adherencia en las barras; y 5,64 MPa que es el respectivo valor obtenido en dichos ensayos para las láminas.

Las diferencias entre las tensiones de adherencia utilizadas son importantes y, por tanto, también entre los aportes teóricos que se derivan. Sin embargo, la variabilidad de los valores obtenida en los ensayos según las tipologías de refuerzo utilizadas impide estimar una tensión de adherencia que se ajuste mejor a todos los resultados experimentales, variando los resultados en todos los casos en uno u otro sentido sin una pauta fija.

5.8. Conclusiones de los ensayos sobre el refuerzo a cortante

En base al estudio experimental sobre el refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado llevado a cabo se demuestra la efectividad del NSM FRP para incrementar la capacidad resistente última de vigas frente a esfuerzos de cortadura.

El incremento de resistencia a cortante conseguido con el refuerzo, referido a la viga patrón y teniendo en cuenta la distinta resistencia del hormigón empleado en cada caso, es limitado cuando se consideran solo tres elementos de refuerzo a 90°, un 8% con barras y un 14 % con láminas; pero se incrementa de forma notable, entre el 50 y el 70%, con 6 elementos a 90° o con 3 a 45°. Con 6 elementos a 45° se consigue un incremento de resistencia de hasta el 80%.

El comportamiento de las barras y láminas en cuanto al incremento de resistencia conseguido es similar, aunque con las láminas se obtienen unos resultados ligeramente superiores. Teniendo en cuenta que las barras tiene una sección un 34% mayor, el rendimiento obtenido por unidad de material sería superior en las láminas.

El incremento de resistencia alcanzado con 6 elementos de refuerzo a 45° es solo un 10% superior al alcanzado con 3 elementos a 45°, a pesar de que se dobla la cuantía de refuerzo. Esto parece debido a que la rotura que se produce en este caso viene acompañada del modo de fallo por desprendimiento del recubrimiento lateral de hormigón de la viga o la separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo.

A falta de más ensayos con cuantías de refuerzo intermedias, y en base a los incrementos de resistencia alcanzados, parece que la cuantía de refuerzo más

adecuada sería utilizar 6 elementos a 90° o, mejor, 3 elementos a 45°, que tienen un 40% menos de longitud de refuerzo.

El modo de fallo observado en todos los casos analizados fue por esfuerzo cortante, sin embargo, en función de la cuantía y orientación de los elementos de refuerzo externo, se puede producir a su vez el desprendimiento del recubrimiento lateral de hormigón de la viga y/o la separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo. Estos modos de fallo aparecen fundamentalmente para una orientación del refuerzo de 45°.

Otro aspecto reseñable en cuanto a los modos de fallo observados es el avance de las fisuras que provocan el fallo final de la viga. A diferencia de la viga de referencia, cuyo fallo se caracteriza por el avance de una fisura característica de cortadura, las vigas reforzadas con NSM FRP presentan en algunos casos fisuras que rodean el refuerzo externo una vez alcanzado éste. Este comportamiento en el avance de las fisuras se observa principalmente para una orientación del refuerzo de 90°, aunque también se produce en el refuerzo a 45°. El bajo incremento de resistencia obtenido para 3 elementos de refuerzo a 90° puede deberse a este particular avance de la fisura. En los casos en los que la fisura rodea la casi totalidad del refuerzo externo se produce el modo de fallo por separación de la cabeza de hormigón.

En cuanto a los niveles de deformación registrados en cercos de acero y FRP, para la viga de referencia se observa un comportamiento muy similar para las bandas situadas dentro de un mismo cerco, con medidas de deformación parejas en función de la aparición de fisuras en las proximidades del punto de medida. Todos los cercos plastifican previamente al fallo de la viga, y se registran valores de deformación máximos en torno a las 4000 $\mu\epsilon$ en la casi totalidad de los cercos.

Para las vigas con refuerzo externo, las bandas extensométricas en cercos y FRP situadas aproximadamente en un mismo punto registran valores de deformación paralelamente a medida que se generan fisuras en sus proximidades. Respecto a la viga de referencia, la deformación registrada en los cercos deja de ser tan pareja y no se registran en general valores de deformación tan elevados. Sólo en algunos casos se registran en los cercos valores de deformación máximos cercanos a las 4000 $\mu\epsilon$. En cuanto a la deformación registrada en el FRP, se aprecian valores de deformación inferiores para la orientación de 90°, no superándose en general las 3000 $\mu\epsilon$ en la mayoría de las barras o láminas con esta orientación. Para el refuerzo a 45° se registran en cambio deformaciones máximas cercanas a las 4000 $\mu\epsilon$ en un mayor número de barras o láminas con esta orientación de refuerzo.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1. Introducción

En esta tesis se ha estudiado experimentalmente el comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas externamente frente a esfuerzos de cortadura mediante materiales compuestos de tipo FRP. El refuerzo de estas vigas se ha llevado a cabo mediante la inserción de barras o láminas de fibra de carbono (CFRP) en ranuras realizadas en el recubrimiento de hormigón de las caras laterales de las vigas (NSM). Cada elemento de refuerzo de FRP se adhiere a la superficie de la ranura realizada a través de un adhesivo de tipo epoxi.

Del estudio de la bibliografía sobre este tipo de refuerzo se llegó a la conclusión de que, con el fin de obtener una mayor comprensión del fenómeno, era conveniente la realización de otro programa experimental sobre el estudio de la adherencia sobre los mismos elementos de CFRP que iban a utilizarse en el refuerzo a cortante.

El estudio experimental sobre la adherencia de las barras y láminas de CFRP fue llevado a cabo mediante la disposición de ensayo conocida como ensayo de la viga o *beam test*. El número de ensayos realizados sobre los dos tipos de refuerzo fueron forzosamente limitados y, dada la importante dispersión en los resultados, esperable según resultados encontrados en la literatura, las conclusiones que se pueden obtener hay que considerarlas siempre con precaución e intentando nunca extrapolar los resultados.

6.2. Conclusiones del programa experimental de adherencia

A continuación se exponen las principales conclusiones alcanzadas en el programa experimental sobre el comportamiento adherente entre el NSM FRP y el hormigón:

- El ensayo de la viga o *beam test* adaptado al estudio de la adherencia del NSM FRP, aunque presenta ciertas dificultades de aplicación, resulta adecuado para el estudio de la adherencia de barras o láminas de FRP utilizadas como refuerzo mediante NSM y representa mejor las condiciones de trabajo del NSM FRP que el ensayo de arrancamiento o *pull-out*.
- Los ensayos han permitido obtener valores de tensión de adherencia para los elementos de refuerzo de FRP y las distintas longitudes totales adheridas. En la mayoría de los casos el fallo se produce por deslizamiento de la barra o lámina en la interfase FRP-adhesivo.
- Se aprecia un mejor comportamiento de las láminas frente a las barras ya que, teniendo una sección neta menor, se obtiene una fuerza de arrancamiento mayor para la menor de las longitudes de adherencia, similar para la longitud de adherencia intermedia y próxima para la mayor de las longitudes de adherencia consideradas.
- Aunque las láminas tienen una sección menor, el empleo de láminas requiere una mayor profundidad de las ranuras, por lo que en aplicaciones prácticas no siempre es posible su utilización por no existir un recubrimiento de hormigón suficiente.
- La tensión media de rotura por adherencia depende del uso de barra o lámina y disminuye con la longitud total adherida de forma que, al menos en primera aproximación, podemos considerar lineal. Por tanto, con estos resultados es posible hacer una estimación de la tensión media de rotura por adherencia, para barras y para láminas, para cualquier longitud de adherencia entre 48 y 144 mm. Los valores obtenidos permitirían el estudio de la adecuación de los parámetros utilizados en los modelos de resistencia de NSM FRP existentes. La extrapolación fuera de estos límites no sería adecuada.

6.3. Conclusiones del programa experimental de cortante

A continuación se exponen las principales conclusiones alcanzadas en el programa experimental sobre el comportamiento de vigas de hormigón armado reforzadas externamente a cortadura mediante NSM FRP:

- La resistencia a cortante de vigas de hormigón armado es un fenómeno complejo que, a falta de modelos analíticos que conduzcan a fórmulas de cálculo coherentes obliga a la adopción de modelos empíricos comprobados en base a los programas experimentales realizados. Estos programas presentan, en general, dispersiones importantes en los resultados, incluso dentro del mismo programa.
- Se demuestra en el programa experimental que el NSM FRP es un método efectivo de refuerzo a cortante de vigas con incrementos de resistencia de hasta el 80% sobre la viga no reforzada.
- El número total de ensayos en el programa es reducido. Pero hay que indicar que, respecto al número de ensayos similares que existen actualmente en la literatura, la aportación de este programa es importante y como tal ha sido recogido en las últimas bases de datos de ensayos publicadas.
- La dispersión en los resultados obtenida dentro del programa experimental es significativa, como sucede en los ensayos de cortante en hormigón armado y más en vigas reforzadas. Llega hasta el 30% entre valores individuales del mismo tipo de refuerzo, pero que se reduce de forma sensible cuando se consideran los cuatro ensayos realizados sobre mismo tipo de refuerzo, bajando al 3 y 5% en algunos de los casos.
- El incremento de resistencia a cortante conseguido con el refuerzo de NSM FRP, referido a la viga patrón y con valores de resistencia homogeneizados, es reducido cuando se consideran solo tres elementos a 90° (el 8% con barras y el 14% con láminas), pero se incrementa de forma notable, entre el 50 y el 70%, para 6 elementos a 90° o 3 a 45°. Con 6 elementos a 45° el incremento es del 80%.
- El incremento de resistencia alcanzado con barras y láminas es similar, aunque con las láminas se obtienen unos resultados ligeramente superiores. Teniendo en cuenta que las láminas tienen una sección un 34% menor respecto a las barras, el rendimiento obtenido por unidad de material sería superior.
- Los incrementos de resistencia con 6 elementos a 45° son solo un 10% superior a los obtenidos con tres elementos a 45°, lejos del incremento de longitud de refuerzo que suponen. Esto parece debido a que la rotura tiene una forma distinta en este caso ya que se produce por desprendimiento del recubrimiento de hormigón de la viga antes de que los refuerzos hayan podido desarrollar toda su capacidad.

- La limitación en el número de barras o láminas utilizadas (3 o 6) impide hacer un estudio de optimización del refuerzo. Sí parece que los incrementos con 3 barras o láminas a 90° son mínimos. También con 6 barras o láminas a 45° la rotura se produce para cargas que no están en proporción con el refuerzo utilizado por producirse una rotura prematura del recubrimiento de hormigón. Estas disposiciones parecen que podrían acotar los límites mínimos y máximos del refuerzo a cortante para la luz de cortante ensayada.
- A falta de más ensayos con cuantías de refuerzo intermedias, y en base a los resultados alcanzados y al mejor aprovechamiento del material, parece que la cuantía de refuerzo más adecuada sería 3 elementos a 45° .
- El modo de fallo observado en todos los casos analizados fue por esfuerzo cortante como era de esperar, sin embargo, puede producirse a su vez el desprendimiento del recubrimiento lateral de la viga y/o la separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo. Este tipo de fallos aparecen principalmente para la orientación de refuerzo de 45° .
- El fallo final de la viga en la mayoría de los casos no se produce por el avance de una fisura característica de cortante con un ángulo aproximado de 45° , si no por el avance una fisura que bordea en mayor o menor medida el refuerzo externo, especialmente si éste está orientado a 90° . El bajo incremento de resistencia logrado con 3 elementos de refuerzo a 90° puede deberse a este particular avance de la fisura.
- La aproximación teórica del modelo de Rizzo y De Lorenzis a los resultados experimentales depende sensiblemente de la tipología de refuerzo y de la tensión de adherencia adoptada. No se aprecia un buen ajuste entre los resultados experimentales y teóricos para las tensiones de adherencia consideradas, y la variabilidad en los resultados impide estimar una tensión de adherencia que ajuste apropiadamente en todos los casos.
- Esta falta de ajuste entre los resultados experimentales y teóricos puede deberse a que el modo de fallo observado en la mayoría de los casos no se produce por el avance de una fisura con un ángulo de 45° , sobre la que se basa el cálculo teórico inicial, si no por el avance de una fisura que en algunos casos bordea parte del refuerzo. Además, para algunas tipologías de refuerzo, se produce el fallo añadido del desprendimiento del recubrimiento lateral de la viga y/o separación de la cabeza de hormigón por encima del refuerzo, no contemplados por el modelo.

6.4. Líneas de trabajo futuro

Como se ha indicado repetidamente a lo largo de esta tesis, el comportamiento de vigas reforzadas con NSM FRP frente al esfuerzo cortante es un tema complejo que carece de modelos analíticos o empíricos contrastados suficientemente y, por tanto, en el que es necesario seguir investigando.

Esta tesis no podía pretender llenar ese vacío y, a estas alturas, parece que son más los temas que abre que los que cierra. Por tanto, son diversos los temas en los que se podría seguir investigando, entre los que este doctorando, guiado más por sus motivaciones personales, indicaría los temas de adherencia y los de refuerzo a cortante con NSM FRP de forma separada, como se ha hecho en esta tesis, aunque se encuentren imbricados entre sí.

Adherencia de NSM FRP

- Estudio de otros tipos de CFRP y otras resinas. La adherencia de las barras y láminas de FRP a la resina y ésta a la ranura efectuada depende de numerosos factores. En esta tesis nos hemos circunscrito a elementos de CFRP y a las resinas comercializadas por BASF para el refuerzo mediante NSM. Para intentar obtener conclusiones que tengan un carácter más general es necesario ampliar los ensayos a otros productos con otras formas, dimensiones y terminaciones superficiales. Las propiedades de las resinas son fundamentales para alcanzar la máxima adherencia y, aun manteniendo las condiciones tixotrópicas de las resinas empleadas en este trabajo que faciliten la puesta en obra del NSM hay un amplio abanico de posibilidades de resinas. Sería interesante buscar una optimización del conjunto barra/resina.
- En los ensayos realizados hemos limitado la longitud de adherencia, debido a las dimensiones de las vigas ensayadas, a 144 mm. Con esta longitud máxima no hemos llegado a alcanzar, ni para las barras ni para las láminas, la longitud crítica de adherencia, aquella a partir de la cual no aumenta la fuerza de arrancamiento que se puede producir en éstas. Dependiendo de las vigas reforzadas a cortante es posible llegar a longitudes adheridas a ambos lados de la fisura superiores a esa cantidad, o al menos a los valores máximos utilizados, 144 mm. Para realizar estos ensayos con mayores longitudes mediante la disposición *beam test* habría que utilizar vigas de dimensiones mayores, que están ya definidas en la norma de ensayo. Sin embargo, debido a la muy baja rigidez lateral de las barras, y más aún de las láminas, la realización de estos ensayos presenta dificultades adicionales. Habría que estudiar las formas de sujeción de los dos semibloques durante el pegado y curado que asegurasen el correcto estado de las vigas al llegar al ensayo.

- Finalmente, referido a la adherencia, hay otro punto unido al anterior que presenta gran interés. Sería la obtención de las curvas tensión de adherencia-deslizamiento en las barras a lo largo del ensayo. En esta tesis hemos presentado unas mediciones exploratorias realizadas en cuatro de las vigas ensayadas. Para ello habría que instalar puntos de medición suficientemente próximos a lo largo de la longitud de adherencia. La utilización de bandas extensométricas presenta algunas dificultades debido fundamentalmente a las pequeñas dimensiones de las barras donde deben ser adheridas que hacen que sea difícil asegurar que no se alteran las condiciones de adherencia barra/resina, y además es difícil asegurar la integridad de las bandas y la exactitud de las mediciones cuando se inicia el deslizamiento de la barra. Una solución posible sería la utilización de sensores de fibra óptica que tienen facilidad para medir en posiciones muy próximas a lo largo de la barra.

Refuerzo a cortante con NSM FRP

- En similitud con lo indicado en el primer punto de adherencia, una vez realizada la caracterización de la adherencia con otros tipos de barras y resinas habría que estudiar la resistencia a cortante de vigas reforzadas con estos nuevos tipos buscando también una optimización de estos elementos.
- Debido a las limitaciones del programa de ensayos sólo se han podido analizar 4 tipologías de refuerzo para las barras y láminas: 3 o 6 elementos en la luz de cortante colocados a 45° o 90°. Estos ensayos han servido al menos para acotar las tipologías útiles: entre tres barras a 90° o 6 a 45° para esa luz de cortante. Cuántas intermedias podrían ensayarse buscando una optimización del refuerzo o maximización del incremento de resistencia.
- Estudio sobre vigas de mayores dimensiones, del alma y luz de ensayo, que permitiesen mayores longitudes de adherencia y con cabezas de compresión mayores (secciones en “T”) que permitiesen extrapolar los resultados obtenidos.
- Búsqueda de sistemas de refuerzo que pudiesen incrementar la resistencia a cortante aportada por las barras mediante sistemas de anclaje de las mismas a las vigas. En este punto hasta ahora se han ensayado la colocación de algún elemento de fijación en los extremos de las barras o la introducción de las barras no en ranuras exteriores sino en perforaciones realizadas desde la cabeza superior dentro de la zona confinada por los cercos.
- La realización o adaptación de un modelo numérico que, calibrado por los resultados obtenidos permitiese un estudio paramétrico de la resistencia a

cortante disminuyendo el número de ensayos, siempre necesarios, para caracterizar la resistencia.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI-318R (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. Design code. Michigan, USA: American Concrete Institute.
- ACI-440.1R (2006). Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute.
- ACI-440.2R (2008). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening of concrete structures. Farmington Hills, Michigan, USA: American Concrete Institute.
- Al-Mahmoud, F., Castel, A., François, R. and Tourneur, C. (2011) 'Anchorage and tension-stiffening effect between near-surface-mounted CFRP rods and concrete', *Cement and Concrete Composites*, 33(2), pp. 346-352.
- Anwarul Islam, A. K. M. (2009) 'Effective methods of using CFRP bars in shear strengthening of concrete girders', *Engineering Structures*, 31(3), pp. 709.
- Baghi, H. and Barros, J. A. O. (2017) 'New Approach to Predict Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Strengthened with Near-Surface-Mounted Technique', *ACI Structural Journal*, 114(1), pp. 137-148.
- Baghi, H., Barros, J. A. O. and Menkulasi, F. (2016) 'Shear strengthening of reinforced concrete beams with Hybrid Composite Plates (HCP) technique: Experimental research and analytical model', *Engineering Structures*, 125, pp. 504-520.
- Bank, L. C. (2006). *Composites for Construction: Structural Design with FRP Materials*. John Wiley & Sons.
- Barbero, E. J. (1999). *Introduction to composite material design*. Taylor and Francis.

- Barros, J. A. O. and Dias, S. J. E. (2006) 'Near surface mounted CFRP laminates for shear strengthening of concrete beams', *Cement and Concrete Composites*, 28(3), pp. 276-292.
- Bianco, V., Barros, J. A. O. and Monti, G. (2007) 'A new approach for modelling the NSM shear strengthening contribution in reinforced Concrete beams', in Triantafillou, T.C. (ed.) *Fiber-Reinforced Polymetr Reinforcement for Concrete Structures*. Patras (Greece): University of Patras.
- Bianco, V., Barros, J. A. O. and Monti, G. (2009) 'Three dimensional mechanical model for simulating the NSM FRP strips shear strength contribution to RC beams', *Engineering Structures*, 31(4), pp. 815-826.
- Bianco, V., Barros, J. A. O. and Monti, G. (2010) 'New Approach for Modeling the Contribution of NSM FRP Strips for Shear Strengthening of RC Beams', *J. Compos. for Constr.*, 14(36).
- Bianco, V., Monti, G. and Barros, J. A. O. (2011) 'Theoretical Model and Computational Procedure to Evaluate the NSM FRP Strips Shear Strength Contribution to a RC Beam', *Journal of Structural Engineering*, 137, pp. 1359-1372.
- Bianco, V., Monti, G. and Barros, J. A. O. (2014) 'Design formula to evaluate the NSM FRP strips shear strength contribution to a RC beam', *Composites: Part B*.
- Bilotta, A., Ceroni, F., Barros, J. A. O., Costa, I., Palmieri, A., Szabo, Z. K., Nigro, E., Matthys, S., Balazs, G. L. and Pecce, M. (2015) 'Bond of NSM FRP-Strengthened Concrete: Round Robin Test Initiative', *Journal of Composites for Construction*.
- Bilotta, A., Ceroni, F., Di Ludovico, M., Nigro, E., Pecce, M. and Manfredi, G. (2011) 'Bond efficiency of EBR and NSM FRP systems for strengthening concrete members', *Journal of Composites for Construction*, 15(5), pp. 757-772.
- Bilotta, A., Ceroni, F., Nigro, E. and Pecce, M. (2014) 'Strain assessment for the design of NSM FRP systems for the strengthening of RC members', *Construction and Building Materials*, 69, pp. 143-158.
- Blaschko, M. (2003) 'Bond behaviour of CFRP strips glued into slits'. *6th International Symposium on Fibre-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Singapore, 205-214.
- Borchert, K., Zilch, K. and Knöfel, R. (2007) 'Epoxy Resin Bonded NSM FRP Reinforcement under Environmental and Load Conditions', *Structural Engineering Research Frontiers*, 249(60).
- Callister, W. D. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverté.
- Capozucca, R., Blasi, M. G. and Corina, V. (2015) 'NSM technique: bond of CFRP rods and static/dynamic response of strengthened RC beams', *Composite Structures*, 127, pp. 466-479.
- CEB-FIB (1993). CEB-FIP Model Code 1990 - Design Code. Lausanne, Switzerland Thomas Telford.

- Cisneros, D., Arteaga, A., De Diego, A., Alzate, A. and Perera, R. (2012) 'Experimental Study on NSM shear retrofitting of RC beams'. *6th International Conference on Composites in Civil Engineering (CICE 2012)*, Rome, Italy.
- CNR-DT-200 (2004). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Rome, Italy: National Research Council.
- Coelho, M. R. F., Sena-Cruz, J. M. and Neves, L. A. C. (2015) 'A review on the bond behavior of FRP NSM systems in concrete', *Construction and Building Materials*, 93, pp. 1157-1169.
- Cosenza, E., Manfredi, G. and Realfonzo, R. (1997) 'Behavior and modeling of bond of FRP rebars to concrete', *Journal of Composites for Construction*, 1(2), pp. 40-51.
- De Lorenzis, L. (2004) 'Anchorage length of near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods for concrete strengthening - Analytical modeling', *ACI Structural Journal*, 101(3), pp. 375-386.
- De Lorenzis, L. and Nanni, A. (2001) 'Shear strengthening of reinforced concrete beams with near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods', *ACI Structural Journal*, 98(1), pp. 60-68.
- De Lorenzis, L. and Nanni, A. (2002) 'Bond between near-surface mounted fiber-reinforced polymer rods and concrete in structural strengthening', *ACI Structural Journal*, 99(2), pp. 123-132.
- De Lorenzis, L., Rizzo, A. and La Tegola, A. (2002) 'A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete', *Composites Part B: Engineering*, 33(8), pp. 589-603.
- De Lorenzis, L. and Teng, J. (2007) 'Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures', *Composites Part B: Engineering*, 38(2), pp. 119-143.
- EHE (2008). Instrucción de Hormigón Estructural. España: Comisión permanente del hormigón. Ministerio de Fomento.
- Eligehausen, R., Popov, E. P. and Bertero, V. V. (1983) *Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations*. California, USA: Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California.
- Eurocódigo-2 (2010). Cálculo de estructuras de Hormigón, Parte 1: Reglas generales y reglas para edificios. Código de diseño. Madrid: AENOR.
- FIB (2000). *Bond of reinforcement in concrete. State-of-the-art report*, Lausanne, Switzerland: The International Federation for Structural Concrete (FIB).
- FIB (2001). *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report*. Lausanne, Switzerland: fib.
- Focacci, F., Nanni, A. and Bakis, C. E. (2000) 'Local bond-slip relationship for FRP reinforcement in concrete', *Journal of Composites for Construction*, 4(1), pp. 24-31.

- Galati, D. and De Lorenzis, L. (2009) 'Effect of construction details on the bond performance of NSM FRP bars in concrete', *Advances in Structural Engineering*, 12(5), pp. 683-700.
- Hull, D. (1987). *Materiales compuestos*. Editorial Reverté.
- Jalali, M., Sharbatdar, M. K., Chen, J.-F. and Jandaghi Alaei, F. (2012) 'Shear strengthening of RC beams using innovative manually made NSM FRP bars', *Construction and Building Materials*, 36, pp. 990-1000.
- Kotynia, R. (2009) 'Shear Strengthening of RC Beams with NSM CFRP laminates'. *9th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9)*, Patras, Greece.
- Larralde, J. and Silva-Rodriguez, R. (1993) 'Bond and slip of FRP rebars in concrete', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(1), pp. 30-40.
- Malvar, L. (1995) 'Tensile and bond properties of GFRP reinforcing bars', *ACI Material Journal*, 92(3), pp. 276-285.
- Miravete, A. (2000). *Materiales compuestos*. Editorial Reverté.
- Morsch, E. (1909). *Concrete-steel Construction*. New York, USA: McGraw-Hill.
- Morsch, E. (1920). *Der eisenbetonbau-seine theorie und anwendung (Reinforced concrete construction-Theory and application)*. Stuttgart: Wittwer.
- Nanni, A., Ludovico, M. and Parretti, M. (2004) 'Shear Strengthening of a PC Bridge Girder with NSM CFRP Rectangular Bars', *Advances in Structural Engineering*, 7(4).
- Novidis, D., Pantazopoulou, S. J. and Tentolouris, E. (2007) 'Experimental study of bond of NSM-FRP reinforcement', *Construction and Building Materials*, 21(8), pp. 1760-1770.
- Oehlers, D. J., Rashid, R. and Seracino, R. (2008) 'IC debonding resistance of groups of FRP NSM strips in reinforced concrete beams', *Construction and Building Materials*, 22(7), pp. 1574-1582.
- Olivares, M., Galán, M. and Roa, J. (2003) 'Los composites: características y aplicaciones en la edificación', *Informes de la construcción*, 54.
- Perera, W. K. K. G., Ibell, T. J. and Darby, A. P. (2009) 'Bond behaviour and effectiveness of various shapes of NSM CFRP bars'. *9th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymers Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-9)*, Sidney, Australia.
- Rahal, K. N. and Rumaih, H. A. (2011) 'Tests on reinforced concrete beams strengthened in shear using near surface mounted CFRP and steel bars', *Engineering Structures*, 33, pp. 53-62.
- Rashid, R., Oehlers, D. J. and Seracino, R. (2008) 'IC debonding of FRP NSM and EB retrofitted concrete: Plate and cover interaction tests', *Journal of Composites for Construction*, 12(2), pp. 160.

- Ritter, W. (1899) 'Die Bauweise Hennebique (The Hennebique system of construction)', *Shweizerische Bauzeitung*, 33(7), pp. 59-61.
- Rizzo, A. and De Lorenzis, L. (2009a) 'Behavior and capacity of RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement', *Construction and Building Materials*, 23(4), pp. 1555-1567.
- Rizzo, A. and De Lorenzis, L. (2009b) 'Modeling of debonding failure for RC beams strengthened in shear with NSM FRP reinforcement', *FRP Composites in Construction*, 23(4), pp. 1568-1577.
- Sas, G., Taljsten, B., Barros, J., Lima, J. and Carolin, A. (2009) 'Are Available Models Reliable for Predicting the FRP Contribution to the Shear Resistance of RC Beams?', *Journal of Composites for Construction*, 13(6), pp. 514-534.
- Sena-Cruz, J. M. and Barros, J. A. O. (2002) 'Bond behavior of carbon laminate strips into concrete by pull-out bending tests'. *International symposium Bond in concrete - from research to standards*, Budapest, Hungary, 614-621.
- Sena-Cruz, J. M. and Barros, J. A. O. (2004) 'Bond between near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer laminate strips and concrete', *Journal of Composites for Construction*, 8(6), pp. 519-527.
- Sena-Cruz, J. M., Barros, J. A. O., Gettu, R. and Azevedo, A. F. M. (2006) 'Bond behavior of near-surface mounted CFRP laminate strips under monotonic and cyclic loading', *Journal of Composites for Construction*, 10(4), pp. 295-303.
- Seracino, R., Jones, N. M., Ali, S. M., Page, M. W. and Oehlers, D. J. (2007a) 'Bond strength of near-surface mounted FRP strip-to-concrete joints', *Journal of Composites for Construction*, 11(4), pp. 401-409.
- Seracino, R., Saifulnaz, M. R. R. and Oehlers, D. J. (2007b) 'Generic debonding resistance of EB and NSM plate-to-concrete joints', *Journal of Composites for Construction*, 11(1), pp. 62-70.
- Sharaky, I. A., Torres, L., Baena, M. and Miàs, C. (2013b) 'An experimental study of different factors affecting the bond of NSM FRP bars in concrete', *Composite Structures*, 99, pp. 350-365.
- Sharaky, I. A., Torres, L., Baena, M. and Vilanova, I. (2013a) 'Effect of different material and construction details on the bond behaviour of NSM FRP bars in concrete', *Construction and Building Materials*, 38, pp. 890-902.
- Shield, C. K., French, C. W. and Milde, E. (2005) 'The effect of adhesive type on the bond of NSM tape to concrete'. *7th International Symposium on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, 355-372.
- Soliman, S. M., El Salakawy, E. and Benmokrane, B. (2011) 'Bond performance of near surface mounted FRP bars', *Journal of Composites for Construction*, 15(1), pp. 103-111.
- Taylor, H. (1974) 'The fundamental behavior of reinforced concrete beams in bending and shear', *ACI-Special Publication*, 42, pp. 43-77.
- Teng, J. G., Chen, J. F., Smith, S. T. and Lam, L. (2002). *FRP strengthened RC structures*. John Wiley and Sons.

- Thorenfeldt, E. (2007) 'Bond capacity of CFRP strips glued to concrete in sawn slits'. *8th International Conference on Fibre Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures*, Patras, Greece.
- TR55 (2012). Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. UK: Concrete Society.
- Täljsten, B. (2002). *FRP strengthening of existing concrete structures: design guidelines*. Luleå University of Technology: Division of Structural Engineering.
- Vecchio, F. (2000) 'Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation', *Journal of Structural Engineering*, 126(9), pp. 1070-1077.
- Vecchio, F. and Collins, M. (1986) 'The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear', *ACI Structural Journal*, 83(2), pp. 219-231.
- Yan, X., Miller, B., Nanni, A. and Bakis, C. E. (1999) 'Characterization of CFRP bars used as near-surface mounted reinforcement'. *8th International Structural Faults and Repair Conference*, Edinburgh, Scotland.

ANEJO A

RESULTADOS EXPERIMENTALES

A.1. Introducción

En este anejo se muestran las fotografías de las roturas de las vigas correspondientes al programa experimental llevado a cabo en esta tesis sobre el refuerzo frente a esfuerzos de cortadura de vigas de hormigón armado mediante NSM FRP. Se muestran a su vez a continuación las curvas cortante-deformación en cercos y FRP junto con los perfiles de fisuración obtenidos en dicho programa experimental.

A.2. Rotura de las vigas en el refuerzo con NSM FRP

Figura A.1 Rotura de la viga Referencia (L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.2 Rotura de la viga Referencia (S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.3 Rotura de la viga B90-3a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.4 Rotura de la viga B90-3a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.5 Rotura de la viga B90-6a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.6 Rotura de la viga B90-6a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.7 Rotura de la viga B45-3a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.8 Rotura de la viga B45-3a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.9 Rotura de la viga L45-3a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.10 Rotura de la viga L45-3a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.11 Rotura de la viga L90-3a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.12 Rotura de la viga L90-6a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.13 Rotura de la viga L90-6a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.14 Rotura de la viga B45-6a(L). Lado derecho.

Figura A.15 Rotura de la viga B45-6a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.16 Rotura de la viga L45-6a(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.17 Rotura de la viga L45-6a(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.18 Rotura de la viga B45-3b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.19 Rotura de la viga B45-3b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.20 Rotura de la viga B45-6b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.21 Rotura de la viga B45-6b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.22 Rotura de la viga B90-3b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.23 Rotura de la viga B90-3b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.24 Rotura de la viga B90-6b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.25 Rotura de la viga B90-6b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.26 Rotura de la viga L45-3b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.27 Rotura de la viga L45-3b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.28 Rotura de la viga L45-6b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.29 Rotura de la viga L45-6b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.30 Rotura de la viga L90-3b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.31 Rotura de la viga L90-3b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.32 Rotura de la viga L90-6b(L). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

Figura A.33 Rotura de la viga L90-6b(S). Lado derecho e izquierdo respectivamente.

A.3. Curvas carga - deformación en cercos y FRP

Cada viga está provista en sus extremos de bandas extensométricas instaladas en los cercos de acero ubicados dentro de la luz de cortante. Las bandas se instalan a media altura en cada una de las ramas verticales que conforman los cercos. En la rama derecha se encuentran las bandas designadas como 1, 2 y 3; y en la rama izquierda las bandas 4, 5 y 6. En el refuerzo de FRP la posición de las bandas se toma de forma que la posición de éstas coincida en al menos una de las caras con la posición de las bandas de los cercos. En la cara derecha de la viga se encuentran las bandas

designadas como 7, 8 y 9; y en la cara izquierda las bandas 10, 11 y 12. En aquellos casos en los que alguna de las bandas no haya funcionado, la respectiva curva no aparece en la gráfica y su número se representa tachado en la leyenda. Si no se ha registrado ninguna de las medidas no se representa la respectiva gráfica.

Figura A.34 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga Referencia (L).

Figura A.35 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga Referencia (S).

Figura A.36 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-3a(L).

Figura A.37 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-3a(L).

Figura A.38 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-3a(S).

Figura A.39 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-3a(S).

Figura A.40 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-6a(L).

Figura A.41 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-6a(L).

Figura A.42 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-6a(S).

Figura A.43 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-6a(S).

Figura A.44 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-3a(L).

Figura A.45 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-3a(L).

Figura A.46 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-3a(S).

Figura A.47 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-3a(S).

Figura A.48 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-3a(L).

Figura A.49 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-3a(L).

Figura A.50 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-3a(S).

Figura A.51 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-3a(S).

Figura A.52 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-3a(L).

Figura A.53 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-3a(L).

Figura A.54 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-3a(S).

Figura A.55 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-3a(S).

Figura A.56 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-6a(L).

Figura A.57 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-6a(L).

Figura A.58 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-6a(S).

Figura A.59 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-6a(S).

Figura A.60 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-6a(L).

Figura A.61 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-6a(L).

Figura A.62 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-6a(S).

Figura A.63 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-6a(S).

Figura A.64 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-6a(L).

Figura A.65 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-6a(L).

Figura A.66 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-6a(S).

Figura A.67 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-3b(L).

Figura A.68 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-3b(S).

Figura A.69 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-3b(S).

Figura A.70 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-6b(L).

Figura A.71 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-6b(L).

Figura A.72 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B45-6b(S).

Figura A.73 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B45-6b(S).

Figura A.74 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-3b(L).

Figura A.75 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-3b(S).

Figura A.76 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-3b(S).

Figura A.77 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-6b(L).

Figura A.78 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga B90-6b(S).

Figura A.79 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga B90-6b(S).

Figura A.80 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-3b(L).

Figura A.81 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-3b(L).

Figura A.82 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-3b(S).

Figura A.83 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-3b(S).

Figura A.84 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-6b(L).

Figura A.85 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-6b(L).

Figura A.86 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L45-6b(S).

Figura A.87 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L45-6b(S).

Figura A.88 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-3b(L).

Figura A.89 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-3b(L).

Figura A.90 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-3b(S).

Figura A.91 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-3b(S).

Figura A.92 Curvas cortante-deformación en cercos en la viga L90-6b(L).

Figura A.93 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-6b(L).

Figura A.94 Curvas cortante-deformación en FRP en la viga L90-6b(S).

A.4. Perfiles de fisuración

Se representan a continuación los perfiles de fisuración de las vigas en el refuerzo a cortante con NSM FRP. Indicar que la vista del lado izquierdo de la viga se ha invertido su representación para facilitar su comparación con el lado derecho de la misma.

Figura A.95 Perfil de fisuración de la viga Referencia (L).

Figura A.96 Perfil de fisuración de la viga Referencia (S).

Figura A.97 Perfil de fisuración de la viga B90-3a(L).

Figura A.98 Perfil de fisuración de la viga B90-3a(S).

Figura A.99 Perfil de fisuración de la viga B90-6a(L).

Figura A.100 Perfil de fisuración de la viga B90-6a(S).

Figura A.101 Perfil de fisuración de la viga B45-3a(L).

Figura A.102 Perfil de fisuración de la viga B45-3a(S).

Figura A.103 Perfil de fisuración de la viga L45-3a(L).

Figura A.104 Perfil de fisuración de la viga L45-3a(S).

Figura A.105 Perfil de fisuración de la viga L90-3a(L).

Figura A.106 Perfil de fisuración de la viga L90-3a(S).

Figura A.107 Perfil de fisuración de la viga L90-6a(L).

Figura A.108 Perfil de fisuración de la viga L90-6a(S).

Figura A.109 Perfil de fisuración de la viga B45-6a(L).

Figura A.110 Perfil de fisuración de la viga B45-6a(S).

Figura A.111 Perfil de fisuración de la viga L45-6a(L).

Figura A.112 Perfil de fisuración de la viga L45-6a(S).

Figura A.113 Perfil de fisuración de la viga B45-3b(L).

Figura A.114 Perfil de fisuración de la viga B45-3b(S).

Figura A.115 Perfil de fisuración de la viga B45-6b(L).

Figura A.116 Perfil de fisuración de la viga B45-6b(S).

Figura A.117 Perfil de fisuración de la viga B90-3b(L).

Figura A.118 Perfil de fisuración de la viga B90-3b(S).

Figura A.119 Perfil de fisuración de la viga B90-6b(L).

Figura A.120 Perfil de fisuración de la viga B90-6b(S).

Figura A.121 Perfil de fisuración de la viga L45-3b(L).

Figura A.122 Perfil de fisuración de la viga L45-3b(S).

Figura A.123 Perfil de fisuración de la viga L45-6b(L).

Figura A.124 Perfil de fisuración de la viga L45-6b(S).

Figura A.125 Perfil de fisuración de la viga L90-3b(L).

Figura A.126 Perfil de fisuración de la viga L90-3b(S).

Figura A.127 Perfil de fisuración de la viga L90-6b(L).

Figura A.128 Perfil de fisuración de la viga L90-6b(S).