
CAPÍTULO 6

Capítulo 6 -CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1 Conclusiones

6.1.1 Conclusiones generales

6.1.2 Conclusiones específicas

6.1.2.1 Conclusiones relativas a la serie de ensayos de caracterización de adherencia

6.1.2.2 Conclusiones relativas a la serie de ensayos VPE

6.1.2.3 Conclusiones relativas a la serie de ensayos VHA1

6.1.2.4 Conclusiones relativas a la serie de ensayos VHA_PE

6.2 Líneas futuras de investigación

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

6.1- CONCLUSIONES

6.1.1- Conclusiones Generales

En este último capítulo se presentan las conclusiones que se derivan de los trabajos realizados durante la presente investigación. El objetivo principal de esta tesis es el estudio experimental del refuerzo de puentes utilizando fibras sintéticas y pretensado exterior (en su caso) determinando la capacidad última a flexión de los distintos modelos ensayados, así como los distintos modos de fallo que se producen en función del refuerzo diseñado.

El estudio experimental realizado ha permitido conocer los parámetros fundamentales que caracterizan los mecanismos que rigen el comportamiento hasta rotura de las estructuras reforzadas con materiales compuestos. Así, disponemos de información fiable, acerca de las características mecánicas, de evolución de las reacciones en los distintos puntos de apoyo, de las deformaciones en el hormigón y de las armaduras activas y pasivas en las secciones críticas, de las flechas en los centros de vano, del comportamiento de las diferentes fibras sintéticas utilizadas. Y todo ello, para un modelo a escala muy grande y continuo, que hace que estos resultados sean de los pocos obtenidos a nivel mundial en modelos de grandes dimensiones.

En cuanto al comportamiento de los tendones de pretensado exterior se puede valorar que mediante el modelo desarrollado en la tesis de G. Ramos [Ramos, 1994], se llegan a obtener valores bastante aproximados a los que se presentaron durante los ensayos experimentales. Sin embargo, existen todavía algunas diferencias entre resultados experimentales y numéricos que requieren un análisis más a fondo de sus causas. Los resultados experimentales han demostrado, adicionalmente, que la técnica de pretensado exterior es un método fiable de reparación y refuerzo de estructuras.

Queda demostrado que la aplicación de los materiales compuestos dentro de la Ingeniería Civil ya es una realidad, existiendo realizaciones de refuerzos de estructuras de puentes en diferentes países. Queda demostrado que este tipo de refuerzo aventaja también al refuerzo tradicional bajo condiciones de laboratorio, de tal manera que se pueden resumir estas ventajas como:

- Que no presentan problemas de corrosión, que afecten la adherencia entre el hormigón y el refuerzo externo.
- No se manejan estructuras ni elementos de reparación pesados, lo que facilita la colocación de medios auxiliares y en general, mejora la puesta en obra.

- No es necesaria una superficie de encolado perfectamente plana. Como es el caso de los refuerzos de chapa metálica y en alguna medida también para el caso de las láminas rígidas de fibras sintéticas.

A nivel experimental la combinación de técnicas para la reparación y refuerzo de puentes existentes como lo son la utilización de fibras sintéticas en sustitución del acero pasivo y el pretensado exterior como método para incrementar la capacidad portante de un elemento estructural, presenta grandes ventajas en relación a las técnicas tradicionales, ya que ambas respetan las características geométricas de la sección transversal del puente a reparar, son de rápida puesta en obra y como consecuencia dan lugar a una gran reducción de los medios auxiliares de puesta en obra.

La respuesta seccional durante los ensayos, (a pesar de que los materiales compuestos utilizados se comportan de manera elástico lineal) es adecuada de cara a la ductilidad en estados avanzados de carga.

Los ensayos llevados a cabo hasta el momento han demostrado la factibilidad y eficacia de la reparación de puentes dañados mediante pretensado exterior, bandas de fibras aramidas y bandas de fibra de carbono. Debido a los distintos modos de fallo que se producen, y que se comentarán más adelante. El valor máximo de la carga que pueden soportar las bandas utilizadas como refuerzo pasivo viene condicionado por la resistencia a tracción del hormigón reparado, de manera que en ningún caso las fibras de refuerzo llegan a movilizar la totalidad de su resistencia última, aún considerando el efecto local del punzonamiento en apoyo central. Por tanto, se propone como conclusión, el empleo de estas fibras por sus características físicas, químicas, y de puesta en obra, etc. más que por su elevada resistencia. Una conclusión a tener en cuenta es que la utilización de fibras menos resistentes sería más eficiente, ya que rebajaría el coste del refuerzo sin disminuir su eficacia.

Adicionalmente otro elemento que permite obtener una buena evaluación de la fiabilidad de la reparación con TFC y Arapree es el hecho que para garantizar que los datos de comportamiento seccional fuesen exclusivamente los generados por las fibras, se procedió a remover el acero pasivo plastificado en las zonas sometidas a esfuerzos de tracción; este hecho no se realizaría en una reparación real, con lo cual, en su aplicación práctica existiría una capacidad remanente del acero pasivo de la estructura.

Respecto a la metodología de ensayo empleada hay que decir que:

1) Los datos obtenidos de las series de ensayos de caracterización de materiales han resultado esenciales para la determinación de los valores de adherencia entre fibras y hormigón, así como también la técnica de aplicación y las características de las resinas epóxicas a utilizar en los ensayos con los modelos de puente.

2) La disposición de los elementos de adquisición de datos para cada uno de los ensayos, ha sido la adecuada, ya que han permitido la descripción del comportamiento tenso – deformacional de las estructuras estudiadas.

3) El desarrollo de cálculos preliminares a los ensayos es indispensable para el planteamiento correcto de la fase experimental (verificación de pórtico de carga, aparatos de apoyo, armado y comportamiento inicial de los modelos a utilizar, valores de penetración de cuña, coeficiente de rozamiento, fuerza de tesado). Gracias a la utilización de un modelo numérico se puede valorar previamente el comportamiento estructural y la magnitud de las fuerzas y esfuerzos actuantes sobre los modelos, permitiendo modelizar el pretensado exterior adherente o no adherente; alcanzando datos fiables para el análisis de la estructura llevada hasta la rotura.

6.1.2 Conclusiones específicas:

6.1.2.1 Conclusiones relativas a la serie de ensayos de caracterización de adherencia.

Se expondrán en este apartado las conclusiones relativas al primero de los objetivos específicos, que es el de determinar las características de adherencia estáticas de las fibras pegadas exteriormente y el hormigón según se apunta en el apartado 4.4.1.

- El objetivo era conseguir las condiciones óptimas de adherencia de las bandas rígidas de aramida, utilizando para ello diferentes técnicas de pegado y diferentes tipos de adhesivos, comparando dichos resultados con los realizados con armaduras embebidas, con armaduras embebidas y dispuestas en segunda fase con inyección de distintos tipos de mortero; además de ensayos con fibras embebidas. Adicionalmente, se trataba de evaluar a fatiga mediante una serie de ensayos dinámicos los productos y técnicas (combinación técnica de pegado – tipo de adhesivo), que han dado los mejores resultados de las anteriores series estáticas.

ENSAYOS EA_ACE: (Ensayos de Adherencia con ACero Embebido)

Se ensayan las probetas con acero Ø 16 mm. Embebido. Teniendo una longitud de adherencia de 14 cm. Se ensayaron 3 probetas. Siendo controlado el ensayo por medio de la posición del actuador, con una velocidad de la rampa de carga de 0.005 mm/seg. Llegando a cargas de 81.2 kN en el actuador, por lo que se alcanzó una tensión de adherencia $\tau = 14.42$ MPa.

ENSAYOS EA_MI: (Ensayos de Adherencia con Mortero Inyectado)

Esta serie de ensayos se desarrolla con barras de acero corrugado Ø 16 mm., siendo en segunda fase inyectados con mortero de base cemento, teniendo longitudes de adherencia de 8, 12 y 16 cm. El número de ensayos realizados fue de 6. Al igual que los ensayos correspondientes a la serie EA_ACE, el control de la carga se llevó a cabo a través del actuador de la prensa; también a una velocidad de aplicación de la rampa de 0.005 mm/seg. Se obtuvieron resultados superiores a la serie anterior, es decir, para una carga de 85.4 kN., se registró una media de la tensión de adherencia de $\tau = 17.94$ MPa.

ENSAYOS EA_ARA: (Ensayos de Adherencia con ARApree embebido)

Se desarrolla la presente serie experimental con bandas de aramida embebida. Dichas bandas (4mm x 20 mm) han sido embebidas en el hormigón, su longitud de adherencia fue de 14 cm, y el número de ensayos realizados fue de 3. El control del ensayo se realizó por medio de la posición del actuador de carga, con una velocidad de rampa de 0.002 mm/seg. El valor de la carga media que se ha llegado a determinar fue de 38 kN, lo que equivale a una tensión de adherencia en la probeta $\tau = 7.07$ MPa.

ENSAYOS EA_APE: (Ensayos de Adherencia con Arapree Pegado Exteriormente)

Los ensayos correspondientes a esta serie, se han desarrollado con bandas de Kevlar de 4mm x 20mm, se ha llevado a cabo bajo distintas condiciones de preparación tanto superficial como utilizando distintos tipos de adhesivos epóxicos, que son los que a continuación se detallan.:

Tipo de Tratamiento superficial	Tipo de Adhesivo utilizado	Clave	Número de ensayos realizados
Ninguno (pegado directo sobre la superficie de hormigón)	NITOKIT LV NITOBOND E	E A	4
Mínimo (limpieza de la zona a pegar y eliminación de grasas).	NITOBOND SBR	B	4
Medio (limpieza y repicado del hormigón, posterior cepillado, eliminación de partículas y neutralizado).	NITOBOND EP	C	4
Profundo (limpieza, abujardado, cepillado, eliminación de partículas y neutralizado de las zonas, con sujeción externa de las bandas, además de eliminar la primera capa de resina de las bandas).	NITOBOND PC	D	6

La longitud de adherencia fue de 27.5 cm en todos los casos, que corresponde a toda la parte inferior de la probeta a ensayar. El número de ensayos realizados fue de 18. Para el control de la velocidad de las rampas de carga se ha realizado por medio del **clip** de apertura de lazo cerrado. La velocidad aplicada fue de 0.2 micrones/seg. El valor medio de la carga para las series con el adhesivo tipo “D” fue de 24.1 kN, lográndose una tensión de adherencia $\tau = 3.49$ MPa, cuyo valor es similar al valor de rotura por tracción del hormigón. Los resultados con los otros adhesivos y tratamientos superficiales no alcanzaron este valor de rotura a tracción del hormigón rompiéndose antes la interfase compuesto – hormigón, por lo cual se descartaron para su uso posterior en los ensayos en modelos de puente.

ENSAYOS DINAMIC: (ensayos DINAMICos a fatiga)

Los ensayos dinámicos a fatiga se desarrollaron adoptando una amplitud de fuerza con un rango de 0.3 a un 0.7 del valor de la carga última en los ensayos estáticos con fibras pegadas exteriormente, llegándose a realizar 3 ensayos. El control de los ensayos se realizó por la magnitud de carga en el actuador, con una longitud de rampa de 8 kN a una fuerza armónica de frecuencia 2 Hz., con una amplitud de 3.2 kN. Se llegaron a contabilizar como media 2.004.000 ciclos antes de la rotura del sistema hormigón – fibra..

CONCLUSIONES:

- Gracias a la utilización de los sistemas de control de cargas (por deslizamiento, velocidad de apertura de clip, etc.) se han producido resultados fiables en la adquisición de los distintos valores de las tensiones de adherencia.
- Para lograr un refuerzo eficiente cuando se utilizan bandas rígidas resulta fundamental llevar a cabo un tratamiento correcto de las superficies antes del pegado.
- Si se realiza una correcta aplicación con el adhesivo adecuado y un correcto tratamiento superficial, el comportamiento de las bandas de fibras de aramida es tal que no llegan a agotar toda su capacidad a rotura ya que es el hormigón el que falla a tracción ≈ 3.5 MPa, en las zonas cercanas a la interfaz banda – resina epóxi – hormigón.

6.1.2.2 Conclusiones relativas a la serie de ensayosVPE.

Se trata de los ensayos sobre modelos de puente de hormigón con pretensado exterior y reparados mediante bandas rígidas de aramida y planteados en tres etapas.

1) Elemento en estado original sin bloqueo en los desviadores del modelo de hormigón armado con pretensado exterior tesado a 1.000 MPa. (ver apartado 4.4.2). Modelo VPE_1.

2) Una vez ensayada la viga hasta rotura se sustituyen los cordones de pretensado (como técnica de reparación estructural), adicionando un bloqueo en la traviesa de apoyo intermedio para valorar el incremento de longitud en los cordones debido al cambio de longitud entre anclajes (para el caso VPE_1 = 2L y para el caso VPE_2 = L). La tensión de tesado es de 1.200 MPa. Modelo VPE_2 (ver apartado 4.4.3).

3) Una vez ensayado hasta rotura el modelo VPE_1, se sustituyen los cordones de pretensado (en este ensayo sin bloqueo en el apoyo intermedio) y se cortan las barras de acero pasivo en las zonas que han plastificado, sustituyéndolas por bandas rígidas de aramida pegadas exteriormente. Se repara el hormigón dañado y se inyectan fisuras. La tensión de tesado es de 1.100 MPa. Modelo VPE_3 (ver apartado 4.4.4).

El objetivo es determinar la carga última en rotura y la respuesta seccional en cada uno de los ensayos para verificar la viabilidad de la combinación de técnicas de reparación (utilización de pretensado exterior y sustitución del acero pasivo por fibras aramidadas), contando para ello con un esquema de carga idéntico para los tres ensayos consistente en 2 cargas en uno de los vanos separadas 2.4 mt. de los apoyos. Con ello se busca una rotura a flexión positiva en el vano.

Como conclusiones de este ensayo podemos destacar:

- 1) Se han registrado muy buenos niveles de aproximación ente las lecturas experimentales y los valores obtenidos con los modelos numéricos (ver capítulo 5).
- 2) La ductilidad de los modelos experimentales es mayor que la prevista en el modelo del análisis numérico, hecho que puede observarse en los resultados de las flechas a cargas de rotura, las cuales se presentan a continuación:

ENSAYO	Carga de rotura experimental kN (2Q)	Flecha Experimental mm	Carga rotura teórica kN	de Flecha máxima teórica mm
VPE_1	395	60	300	40
VPE_2	410	80	300	40
VPE_3	360	60	340	60

- 3) En cuanto al pretensado exterior, se pudo comprobar que en el ensayo VPE_2, con la disposición del bloqueo mecánico, se logró un pequeño incremento de la capacidad portante.
- 4) Los incrementos de tensión en los cables de pretensado fueron como media de 500 MPa, lo que en algunos casos (según la fuerza de pretensado inicial) representa la plastificación del acero activo (ensayo VPE_2).
- 5) Considerando los resultados de los ensayos VPE_1 y VPE_2 como valores de referencia, en el ensayo en el cual la armadura pasiva es sustituida por fibras sintéticas se obtuvo aproximadamente el 90% de la carga de rotura original. Hay que tener en cuenta que la reparación del modelo VPE_3 se logró tras sufrir 2 ensayos anteriores y 5 ciclos de carga – descarga, previos a dicho ensayo y que se había suprimido la armadura pasiva en las secciones críticas. Teniendo en cuenta la importancia de los daños generados al elemento, mucho mayores sin duda que los que pueden encontrarse en un caso real, el valor del 90% puede considerarse como satisfactorio.
- 6) Las deformaciones registradas para las bandas de aramida fueron alrededor del 10% de su deformación última, lo que permite ver que no se llega a agotar la resistencia a tracción del compuesto, llegando a rotura por tracción del hormigón cercano a la zona pegada (“peeling”).
- 7) El modo de fallo del refuerzo es el de delaminación total del compuesto por la existencia de fisuras de flexión, produciéndose una rotura súbita acentuada, en este caso, por el hecho de la no existencia de armadura pasiva.
- 8) La deformación en las bandas, tanto en la zona de momentos positivos como negativos en el momento de la rotura está en el entorno del 0.2%. Este resultado está en contradicción con los criterios de diseño usuales que señalan que la delaminación por fisuras de flexión puede evitarse si la deformación máxima en el compuesto se limita al 0.6% en la zona de momentos positivos y 0.4% en la de negativos.
- 9) En la viga reparada con bandas de aramida, a pesar de no existir armadura pasiva, se observa un buen control de la fisuración, con fisuras repartidas y poco abiertas.

6.1.2.3 Conclusiones relativas a la serie de ensayos VHA1:

Como tercera fase del estudio sobre reparación y refuerzo de puentes existentes, se plantea desarrollar una serie de ensayos sobre un modelo de puente sección cajón de hormigón armado, el cual es inicialmente ensayado a rotura (ver apartado 4.4.5). Dicho modelo, después de ser llevado a rotura, ha sido reparado y sustituido el acero pasivo por un Tejido de Fibras de Carbono (conocido también como T.F.C.), llevándose a cabo un segundo ensayo hasta rotura (ver apartado 4.4.6). Para esta nueva serie, se ha modificado el esquema de aplicación de cargas, que ahora consiste en la aplicación de una carga 2Q en

centro luz del vano 1, y 2 cargas Q localizadas a 2.4 mt. de los apoyos en el vano 2. Con ello se pretende una rotura a flexión en la zona de momentos negativos del apoyo intermedio.

Las fases del ensayo son las siguientes:

- 1) Se ensaya un modelo monolítico de hormigón armado sin fisuración previa y sin pretensado exterior. La configuración del modelo es similar a la de los ensayos VPE. Modelo VHA1_a (ver apartado 4.4.5).
- 2) Se ensaya el modelo VHA1_a que presenta daños importantes, los cuales consistían en: zonas de hormigón dañadas (zonas cercanas a desviadores y en apoyo intermedio) y zonas donde se plastificó el acero pasivo (zona superior de apoyo intermedio). Se coloca la fibra de carbono en zonas de momentos máximos positivos (centro luz) y momentos negativos (apoyo intermedio) sustituyendo las barras de acero pasivo, inyectando las fisuras con resina epóxica previo al pegado de las fibras. Modelo VHA1_b (ver apartado 4.4.6)
- 3) Una vez ensayado hasta rotura el modelo VHA1_b, debido a la rotura por el apoyo intermedio quedan 2 elementos isostáticos (los dos vanos) que son ensayados hasta rotura por aplicación de carga únicamente en los vanos respectivos. Modelos VHA1_c y VHA1_d (ver apartados 4.4.7 y 4.4.8).

Como conclusiones de estos ensayos podemos citar:

- 1) Se han obtenido buenos resultados en las comparativas de las lecturas experimentales y los datos registrados en el análisis numérico (ver capítulo 5), tal como puede verse en la tabla siguiente:

Ensayo	Carga de rotura experimental kN	Flecha experimental mm	Carga de rotura modelo numérico kN	Flecha modelo numérico Mm
VHA1_a	92.8	10	85	16
VHA1_b	98.4	14	100	26

Los modelos isostáticos VHA1_c y VHA1_d no se analizaron con el modelo numérico. Es más notoria la coincidencia de los valores de las lecturas en el

análisis por elementos finitos en la fase lineal. Posteriormente en fase de prerotura y rotura los valores tienden a divergir.

- 2) Teniendo como referencia el ensayo VHA1_a, la capacidad de carga para el ensayo VHA1_b (refuerzo con fibra de carbono) es aproximadamente un 10% superior al observado en el primer ensayo. El incremento de la capacidad portante se logró después de reparar tras la aplicación de 4 ciclos de carga (valores de carga a niveles de carga de rotura) al modelo inicial.
- 3) Los valores teóricos y experimentales son parecidos hasta llegar a la fase de rotura, donde dichos valores se separan. Para el caso particular del ensayo VHA1_b, el valor teórico de rotura fue superior al experimental. Esto puede deberse a las restricciones impuestas y características del tejido de fibra de carbono introducidas en el modelo. Adicionalmente, no se modelizan la microfisuración, ni ningún otro desperfecto en el modelo.
- 4) En lo que se refiere al comportamiento de las fibras de carbono se observó (ver figuras 4.64 y 4.65) que las fibras trabajaron adecuadamente, obteniendo mayores deformaciones que las del acero pasivo, durante el primer ciclo.
- 5) En todos los ensayos (modelos VHA1_a, VHA1_b, VHA1_c y VHA1_d) antes de producirse la rotura, que en todos los casos es súbita y por delaminación (“peeling”) del compuesto, se observan unas flechas importantes, lo cual confirma, al igual que en el ensayo con fibras aramida, la suficiente ductilidad de los elementos reparados en el sentido de aviso antes de producirse la rotura. O véase por ejemplo, que la viga original en hormigón armado tiene una flecha final de 10mm.; y la viga reparada, de 14mm., un 40% mayor.
- 6) En este caso, se producen dos modos de fallo distintos. En el apoyo intermedio, debido a la gran apertura de fisuras y/o que el tejido de fibra de carbono no es tan rígido como las bandas de aramida, en lugar de producirse una delaminación total del compuesto se produce una delaminación local en la zona de las fisuras acompañada de la rotura del tejido por efecto del punzonamiento local. La máxima deformación medida en la fibra es de 0.6%. Este resultado aconseja que, en el caso de que sean previsibles fisuras localizadas importantes (por poca armadura pasiva o por tratarse de una junta entre elementos prefabricados) es aconsejable utilizar un refuerzo con una rigidez suficiente para que el efecto de corte local no llegue a producir la rotura del refuerzo. (utilizar láminas rígidas en lugar de tejidos). En la zona de vano más cargado, el modo de fallo es el de delaminación por fisuración a cortante debido también a no haber prolongado el refuerzo hasta los apoyos. La máxima deformación medida en la fibra es de 0.4%. Por último, en el otro vano, el fallo se produce por delaminación total del tejido debido a la fisuración a flexión, de modo análogo a la rotura en el caso de las bandas rígidas de aramida. En este último caso, modelo VHA1_d, la deformación en rotura de la fibra es del 0.3% (aproximadamente un 20% de la deformación máxima). De nuevo se confirma aquí que para valores de deformación menores al 0.6% en la zona de momentos positivos puede producirse la delaminación por flexión, contradiciendo, de nuevo, el criterio de diseño de limitar dicha deformación al 0.6%.

- 7) A excepción de la zona superior del apoyo intermedio, la aplicación del tejido de carbono da lugar a un buen control de la fisuración (zonas de vano).

6.1.2.4 Conclusiones relativas a la serie VHA_PE

Como última fase de ensayos, se desarrollaron los trabajos de reparación y refuerzo (reparación con sustitución de las bandas de fibra de carbono dañadas y el refuerzo del modelo con la utilización de pretensado exterior) del modelo de puente ensayado en la serie anterior. Con ello se pretendía, de igual manera que en la serie VPE, verificar la viabilidad de la combinación de técnicas de reparación y refuerzo, pero en este caso utilizando un tejido de carbono en lugar de las bandas rígidas de aramida. Los puntos de aplicación de las cargas son análogos a los del ensayo anterior.

Además, en estos ensayos, a la instrumentación normal se añadieron unos sensores de fibra óptica para medir tanto la deformación en la zona exterior de hormigón como en el tejido de fibra de carbono situado encima mismo del hormigón, para poder verificar si la deformación en ambos puntos coincide.

Las fases del ensayo son las siguientes:

- 1) Partiendo de un modelo con daños importantes se repara y refuerza con pretensado exterior. Se utiliza un pretensado con una tensión inicial de cerca de 1.300 MPa. Modelo VHA_PE_a (ver apartado 4.4.9).
- 2) Una vez ensayado hasta rotura el modelo VHA_PE_a, debido a que el vano 2 se encuentra todavía en buen estado, se hace un nuevo ensayo sobre el mismo, según un esquema de tramo isostático y con cargas únicamente en el vano. Modelo VHA_PE_b (ver apartado 4.4.10).

Las principales conclusiones son las siguientes:

- 1) Los resultados obtenidos experimentalmente son muy similares a los correspondientes datos del análisis numérico, tenemos por ejemplo:

Ensayo	Carga de rotura experimental kN	Flecha máxima experimental mm	Carga de rotura modelo numérico kN	Flecha máxima modelo numérico mm
VHA_PE_a	156.6	20	160	25

- 2) Como se esperaba, después de la reparación del hormigón fisurado, la sustitución del acero pasivo por el Tejido de Fibra de Carbono (T.F.C.) y la colocación del refuerzo con pretensado exterior se logró incrementar la capacidad portante del modelo, respecto al estado original sin fisuración, lo que se puede observar en la siguiente comparativa:

Ensayo	Carga de rotura experimental kN	Flecha máxima experimental mm
VHA1_a	92.8	10
VHA_PE_a	156.6	20

Y ello, a pesar de tratarse de un modelo que ya había sido llevado varias veces hasta rotura.

- 3) En la presente serie, los resultados carga-flecha del análisis numérico fueron ligeramente superiores a los del ensayo. Esto puede deberse a que en el modelo numérico no se pueden recoger los daños remanentes de los ensayos anteriores (microfisuración, eliminación de acero pasivo, etc.).
- 4) En cuanto al incremento de tensión de los cordones de pretensado en el modelo numérico se observaron mayores incrementos, lo cual puede deberse a las condiciones de determinación del rozamiento impuestas en el modelo.
- 5) El incremento de la capacidad portante entre el modelo original (VHA1_a) y el modelo reparado y reforzado (VHA_PE_a) es notable. Quedando demostrado que la capacidad a rotura por flexión de los modelos ensayados se puede mejorar utilizando las técnicas de reparación tradicional (como el rehornigonado, la inyección de fisuras, etc.), reparación de acero pasivo (utilizando la técnica de sustitución por Tejidos de Fibra de Carbono) y el refuerzo (utilizando el pretensado exterior). Los resultados obtenidos permiten pensar en la viabilidad de la utilización de la combinación de dichas técnicas, para el caso de puentes reales.
- 6) El modo de fallo del refuerzo de fibra del modelo de viga continua con pretensado exterior fue muy parecido al que se había obtenido en el modelo en hormigón armado (VHA1_b), con rotura y delaminación localizada en apoyo y delaminación casi simultánea en el vano más cargado. La deformación máxima de la fibra de carbono es del 0.4% (25% de la deformación en rotura) tanto en el apoyo intermedio como en el vano. También en este caso existe un buen control de la fisuración mediante el TFC y una ductilidad apreciable.

- 7) En el ensayo VHA_PE_b la carga de rotura fue de 193.5 kN, superior a los 165.5 kN que se alcanzaron en el ensayo VHA1_d, homólogo del anterior pero sin pretensado exterior. El modo de fallo fue también análogo al del ensayo VHA1_d, con delaminación completa de la fibra por fisuración a flexión. La deformación máxima del TFC fue del 0.3%.
- 8) La utilización de sensores de fibra óptica como monitorización a largo plazo de estructuras reparadas con materiales compuestos parece esperanzadora a la vista de los resultados obtenidos, habiéndose verificado su correcto comportamiento por comparación con bandas extensométricas.
- 9) La utilización de los sensores de fibra óptica ha permitido detectar como existe una deformación distinta entre el hormigón y la fibra que se sitúa encima del mismo, debido, posiblemente a un deslizamiento relativo entre ellos en el interfase relativo a la resina de pegado. Se ha comprobado que el hormigón tiene mayor deformación que la fibra. Esta diferencia podría explicar las deficiencias detectadas en el modelo numérico a la hora de predecir los resultados experimentales ya que en el mismo, se supone una adherencia perfecta entre hormigón y material compuesto. Como hacen todos los criterios de diseño actuales.

6.2- LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo llevado a cabo en esta tesis se ha centrado en el comportamiento a corto plazo (carga hasta rotura) de elementos solicitados y reforzados básicamente a flexión, por ello, consideramos que dos líneas futuras de investigación son, por una parte, el estudio del comportamiento a largo plazo de este tipo de refuerzos, cuando son sometidos a ambientes normales ó agresivos. Habría que ver si las patologías que afectan al hormigón pueden provocar también una pérdida de eficacia del refuerzo. Por otra parte, el estudio del comportamiento hasta rotura de elementos reforzados frente a esfuerzo cortante es otra línea en la que se debe seguir trabajando.

Un campo a investigar es el de la monitorización a largo plazo de estructuras reforzadas con materiales compuestos mediante la utilización de sensores de fibra óptica u otros con prestaciones parecidas. Habría también que conocer cual es el comportamiento a largo plazo de estos sensores mediante la realización, por ejemplo, de ensayos de ataque acelerado.

Se ha visto también que la hipótesis de adherencia perfecta entre hormigón y material compuesto de refuerzo no siempre cumple, sobre todo en situaciones cercanas a rotura. Este es un campo en el que se hace necesaria una mayor investigación, puesto que la hipótesis de no deslizamiento fibra – hormigón puede conducir a proyectos inseguros.

Por último, se ha constatado como en todos los casos el fallo del refuerzo con fibras se ha producido sin que éstas llegaran a movilizar su resistencia final. Por todo ello, sería adecuado intentar fabricar materiales compuestos con resistencias no tan elevadas

(utilización de otro tipo de fibras, compuestos con menor contenido en fibra, etc.), lo cual se traduciría, sin duda, en un menor coste y, como consecuencia, a salvar uno de los obstáculos por los que este tipo de refuerzos no tiene todavía una aplicación mayor en la ingeniería civil, cual es el elevado coste del material.

