

### **33. Proyectos de rehabilitación estructural. La sostenibilidad de los refuerzos con materiales compuestos.**

**González, Victoriano** <sup>(1,\*)</sup>, **Barrios-Padura, Ángela** <sup>(2)</sup>; **Molina-Huelva, Marta** <sup>(3)</sup>

(1,\*) LABRUM S.L., victorianogonzalez@labrum.eu, (+34)629 83 07 68

(2) Departamento de Construcciones Arquitectónicas I. U. de Sevilla.

(3) Instituto Universitario de Arquitectura y Ciencias de la Construcción. U. de Sevilla.

**Resumen** Las obras de refuerzo de estructuras de hormigón armado son complejas, de elevado coste, y con un fuerte impacto en el entorno inmediato. Las soluciones de reparación con materiales compuestos formados por polímeros armados con fibra, FRP (Fibre Reinforced Polymer), son las más eficientes, si tenemos en cuenta sus características mecánicas y ligereza. Para evaluar su sostenibilidad es preciso analizar este tipo de operaciones de rehabilitación estructural desde criterios ambientales y económicos, pero sobre todo sociales, considerando a las personas que habitan en los edificios e infraestructuras, y a las que trabajan en las obras. A través de un trabajo documental en las empresas andaluzas Vorsevi, Labrum y Azul Construcción, sobre diferentes investigaciones, estudios y obras con refuerzos con fibra de carbono (CFRP) se ha realizado un análisis de las circunstancias y la complejidad de la puesta en obra, de los impactos medioambientales y en las personas, y de aspectos relacionados con el control de calidad de la ejecución para asegurar el adecuado funcionamiento, durabilidad, y amortización de impactos a largo plazo.

**Palabras clave** Rehabilitación sostenible, Materiales compuestos, Fibra carbono, Refuerzo estructuras, Control de calidad.

#### **1. Introducción**

La viabilidad y eficiencia de una intervención de rehabilitación o reparación se evalúa generalmente en base a aspectos relacionados con la capacidad técnica de la dirección facultativa y económica de los promotores (públicos o privados). Sin embargo, es preciso considerar la complejidad de las operaciones y su impacto en el entorno, siendo determinante en la mayoría de los casos que no se interrumpa el uso o servicio del edificio o infraestructura en el periodo de ejecución de la obra.

La reparación de una estructura de Hormigón Armado requiere de actuaciones muy molestas para los usuarios, debiendo proceder en muchos casos al desalojo de edificios o a la interrupción del tráfico de vías y pasos elevados, con el objeto de asegurar el bienestar y la seguridad de las personas.

Son obras complejas y de coste elevado. El resanado de secciones de hormigón genera ruido y polvo en el ambiente, y si el deterioro es grave, es preciso apagar la estructura durante el proceso, lo que dificulta el acceso y uso. La limpieza y saneado de los elementos estructurales, ha de hacerse con sumo cuidado, decidiendo en cada caso si es preciso suplementar barras o reforzar con otros elementos estructurales. Cuando la zona a tratar está ubicada en una parte de difícil acceso, o por donde pasan instalaciones, es preciso ejecutar obras de desmontado o demolición (cableado, tuberías de agua, tabiquería, carpinterías, solerías), lo cual encarece más aún la obra. En definitiva, al analizar una obra de refuerzo de estructura de hormigón armado desde criterios económicos, medioambientales y sociales, se pone en crisis su sostenibilidad.

Existe una innegable necesidad de producir de forma sostenible en el sector de la construcción. Las políticas de rehabilitación del parque inmobiliario, la preservación de edificios por su interés arquitectónico o por cambio de uso, y la necesidad de alargar la durabilidad de grandes infraestructuras nos obligan a desarrollar métodos de reparación estructurales que sean capaces de satisfacer las necesidades presentes y no comprometan las generaciones venideras.

Sin embargo la ejecución de un refuerzo de CFRP necesita unas pautas fundamentales a seguir para su adecuada ejecución, inspección y control de calidad (IVE 2008 a y 2008 b).

La incidencia del control de calidad del proceso de aplicación del refuerzo estructural, se plantea ya como necesidad desde los años 90, en diversos estudios y documentos oficiales como el Informe de Evaluación del Edificio de la Comunidad Valenciana (Serrano 2014); los trabajos para una guía de actuaciones en forjados realizados en el seno de la Subcomisión SC3, Comisión Técnica de Calidad de Edificación del Ministerio de Fomento; documentos como el “Procedimiento para actuaciones e intervención diseñado por el Instituto Valenciano de la Vivienda, IVVSA”, “Recomendaciones para el reconocimiento sistemático y la diagnosis rápida de forjados con presencia de cementos aluminosos” de la Generalitat de Catalunya (Maña y Bellmunt 2005), “Patología, reparación y refuerzo de estructuras” (Río 2008), y diferentes instrucciones y guías (BASF 2011), (BASF 2012), (Sika 2007), UNE EN 1504-10, ACI 440.2R-08.

El objetivo de la investigación que se presenta en este trabajo es valorar la sostenibilidad del refuerzo de estructuras con materiales compuestos, incidiendo en su eficacia y limitados impactos medioambientales, económicos y sobre todo sociales en comparación con otros sistemas, y poner en valor la necesidad del control de calidad en las fases de ejecución y mantenimiento durante su vida útil.

El análisis se realiza centrándose exclusivamente en el refuerzo empleado, ya que se considera que, a efectos comparativos entre diferentes tipos de refuerzos,

las operaciones previas de saneado y reparación de estructuras dañadas es una constante común para cualquier tipo de refuerzo.

Este trabajo se encuadra dentro del proyecto de investigación “Nuremco” financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad en el Programa Feder Interconecta en el que participaron la empresa VORSEVI y la Universidad de Sevilla. Posteriormente se amplía la investigación entre el grupo de investigación Paidi TEP954 de la Escuela de Arquitectura de Sevilla y la empresa LABRUM con la colaboración de la empresa AZUL CONSTRUCCIÓN.

## **2. Rehabilitación sostenible de estructuras de hormigón armado**

En la conservación y mantenimiento de las estructuras es frecuente que los técnicos nos planteemos si es posible su rehabilitación o si debemos proceder a su demolición y reconstrucción. En muchas ocasiones es preciso realizar un refuerzo puntual o general, según el objeto del proyecto: el incremento de carga por cambio de uso del edificio, la necesidad de mejora de las condiciones de servicio, los cambios en el sistema estructural, la adecuación a nuevas normativas, la existencia de defectos de proyecto o ejecución, lesiones detectadas, etc. Los tres tipos de refuerzos empleados con mayor frecuencia son: los recrecidos estructurales de las secciones resistentes a base de hormigón armado o morteros estructurales armados, la superposición o enfundado con perfiles o chapas metálicas y los refuerzos con CFRP.

En la realización de una rehabilitación sostenible, los refuerzos de CFRP presentan importantes ventajas de frente a los dos primeros, si se analizan desde criterios ambientales, económicos y sociales, en base a su menor peso y facilidad de transporte, mayor facilidad de puesta en obra, mejor adaptación a la geometría de los elementos estructurales, menor interferencia con otros elementos constructivos e instalaciones, mayor resistencia con menores secciones de refuerzo, no sufrir corrosión, y tener mejor comportamientos ante incendios.

### ***2.1 Aspectos medioambientales***

Para valorar la sostenibilidad de productos o de procesos de construcción desde criterios medioambientales se emplean herramientas basadas en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como son las Declaraciones Ambientales de Productos (DAP), que evalúan, en cada etapa de la vida de un producto (desde la extracción de la materia prima hasta la gestión de los residuos), los impactos relacionados con el potencial calentamiento global, el agotamiento de la capa de ozono, la acidificación, la eutrofización, la formación de oxidantes fotoquímicos, el agotamiento de los recursos y la producción de residuos.

No existen DAP de refuerzos de CFRP en el sector de la construcción, aunque algunas aproximaciones a las mismas se pueden encontrar en la industria de los aerogeneradores (Rivarola et al. 2011), o en la industria del automóvil (Muñoz et al. 2008).

Debido a la carencia de datos sobre el ACV de los laminados de CFRP (Pereira 2015), el análisis del coste medioambiental se realiza en base un único parámetro, **el consumo de energía**, en todas las fases de fabricación del material, hasta el tratamiento de residuos y reciclado al final de su vida útil.

La primera etapa de análisis es la extracción de la materia prima y la fabricación de los productos del CFRP. En la Tabla 1 se recogen los datos de la energía primaria consumida por kg de material en la fase de producción (Song et al. 2009).

**Tabla 1** Energía primaria para la extracción de diferentes tipos de materiales y la adicional para la fabricación de los materiales compuestos (Song et al. 2009)

	Energy intensity (MJ/kg)
<b>Materiales</b>	
<b>Polímeros</b>	
Poliéster	69-78
Epoxi	76-80
LDPE	65-92
PP	72-112
PVC	53-80
PS	71-118
PC	80-115
<b>Fibras</b>	
De vidrio	13-32
De carbono	183-286
<b>Metales</b>	
Aluminio	196-257
Acero	30-60
Acero inoxidable	110-210
Cobre	95-115
Zinc	67-73
Acero de fundición	60-260
<b>Métodos de fabricación</b>	
Moldeo en autoclave	21.9
Moldeo por Transferencia de Resina	12.8
Moldeo por infusión de resina asistida por vacío	10.2
Presión en frío	11.8
Pultrusion	3.1
Moldeo por inyección	19

Tal y como se puede apreciar en la tabla, la energía primaria para la extracción de la materia prima en la producción de resinas de poliéster y epoxi usadas en la fabricación de materiales compuestos es baja, por el contrario la generación de la

fibras de carbono (empleada para los refuerzos de CFRP) presenta una alta intensidad de consumo energético (183-286 MJ/kg) frente al resto de fibras comparadas, en este sentido los refuerzos con fibra de carbono parten en desventaja frente a otros materiales. En cuanto a los procesos de fabricación el modelado en autoclave es el que mayor energía consume y el de menor la pultrusión (3,1 MJ/kg). Ahora bien, en el primer proceso del análisis de la siguiente etapa, en la aplicación, la elevada ligereza de la fibra de carbono, genera una reducción significativa de la energía necesaria para el transporte de la misma frente a otros materiales más pesados como el acero. Se puede cuantificar una reducción de peso de entre el 60 y 80% de los materiales compuestos frente al acero, por lo que en esta fase del ciclo de vida ambos refuerzos se puede decir que se encuentran igualados en cuanto a consumo energético.

La deducción del **consumo de energía del transporte**, se realiza de acuerdo con la publicación del CIEMAT (Lago 2007), para un vehículo de referencia de gama media, ya que lo se pretende es hacer un estudio comparativo, aun no siendo el transporte más adecuado. Teniendo en cuenta que la gasolina tiene un poder calorífico de 42,9 MJ/kg, y que el consumo es de 0,073 l/km = 0,0624 kg/km, restringiendo el transporte de un material al 80% de la máxima capacidad de carga, 489 kg del vehículo de referencia, la energía necesaria para transportar 1 Kg de un material sería  $6,85 \cdot 10^{-3}$  MJ/kg · km.

$$(42.9 \text{ MJ/kg} \cdot 0.0624 \text{ kg/km}) / (0.8 \cdot 489 \text{ kg}) = 6.85 \cdot 10^{-3} \text{ MJ/kg} \cdot \text{km} \quad (1)$$

En consecuencia en un primer análisis de consumo de energía referido solo al transporte, si comparamos la ejecución de una refuerzo para el mismo edificio con CFRP y con acero, atendiendo a que en peso ambos refuerzos se encuentran en relación 1/8 (CFRP/ACERO), el coste energético unitario del transporte de la fibra de carbono es de  $6,85 \cdot 10^{-3}$  MJ/kg · km frente a  $34,22 \cdot 10^{-3}$  MJ/kg · km del acero. A mayor distancia de transporte entre el lugar de producción y el de aplicación más se compensa la diferencia energética entre sendos refuerzos y sus ciclos de vida.

Con respecto a la fase de **fin de la vida del producto**, la producción de residuos y el reciclado de los materiales compuestos carbono/epoxi, es preciso hacer notar que actualmente es una industria en auge, y muy interesante para los productores, atendiendo al elevado coste energético y económico de la producción de la fibra de carbono, siendo los métodos considerados en los más recientes estudios los que se relacionan a continuación:

- Reciclados con microondas (Jiang et al. 2015). Este estudio muestra el gran potencial de la fibra de carbono reciclada con la irradiación de microondas.
- Reciclado por “*solviosis*”. (Keith et al. 2016). Método utilizado para degradar la resina de dos variedades diferentes de fibra de carbono con base de epoxi utilizando una mezcla de acetona y agua a una temperatura de 320° C, este proceso requiere un consumo de energía de 19 MJ/Kg de fibra, aunque el proceso no ha sido optimizado muestra un gran potencial para el futuro.

- Extracción mecánica. (Howarth et al. 2014). Mediante energía eléctrica de fresado como una opción de reciclaje de compuesto de fibra de carbono, llegándose a un consumo de energía de 2,03 MJ/Kg.

A continuación se muestra el cálculo comparativo de la energía necesaria en el ciclo de vida de un refuerzo con CFRP frente a un refuerzo con chapas de acero. En el estudio se incluye la fase de reciclado y recuperación de material, optimizando el beneficio energético en el final del ciclo de vida de los refuerzos de CFRP.

**Tabla 2** Estudio comparativos entre refuerzos con CFRP y acero. Elaboración propia.

<b>Etapas</b>	<b>Refuerzos con CFRP (MJ/kg)</b>	<b>Refuerzo acero (MJ/kg)</b>
Obtención materiales	286	60
Manufactura	3,1	3,1
Transportes (500 km)	3,43	3,43
Aplicación <sup>(1)</sup>	--	--
Mantenimiento <sup>(2)</sup>	0	31,16
Extracción (desmontado)	2,03	2,03
Reciclaje	19	8,6 <sup>(3)</sup>
Material recuperado	-286	-60
<b>Total final vida útil</b>	<b>27,56</b>	<b>47,21</b>

(1) Se estima un consumo energético similar aunque los refuerzos con CFRP necesitan menos medios auxiliares

(2) Supuesta una vida útil de 30 años, repintado cada 10 años

(3) Osorio 2011.

Teniendo en cuenta la relación indicada 1/8 de un refuerzo (CFRP/acero) el consumo de energía del refuerzo de acero final es de 377.68 MJ/kg o lo que es lo mismo 13.7 veces superior al CFRP. Por lo tanto, desde el punto de vista de consumo energético se pone de manifiesto la gran ventaja del refuerzo con materiales compuestos en relación a los refuerzos con acero.

## **2.2 Aspectos económicos**

Otro de los conceptos erróneos sobre los refuerzos de estructuras de hormigón armado con CFRP, es que presentan un elevado coste frente a otro tipo de refuerzos. El precio unitario de la materia prima es más elevado, pero al precisar menos cantidad de material, menos medios auxiliares, menos medidas de seguridad, y menos volumen de obra de desmontado de instalaciones, tabiquerías, etc, en conjunto los costes disminuyen.

En la Tabla 3 se recogen los precios de la ejecución de algunos refuerzos ejecutados con recercidos de hormigón, elementos metálicos y CFRP según la base de datos del generador de precios de la construcción de Cype Ingenieros.

**Tabla 3** Precios extraídos del generador de precios de la construcción de Cype Ingenieros.

TIPO REFUERZO	DESCRIPCIÓN UNIDAD	COSTES (€)
RECRECIDOS DE HORMIGÓN	ml Refuerzo de pilar de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	98,69
	ml Refuerzo de pilar de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón proyectado.	101,42
	ml Refuerzo de viga descolgada de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	43,93
	ml Refuerzo de viga descolgada de hormigón armado, mediante recrecido con hormigón armado.	19,37
ELEMENTOS METÁLICOS	ml Refuerzo de pilar de hormigón armado, con perfiles metálicos empresillados.	62,37
	Ud. Refuerzo de base y capitel de pilar de hormigón armado, con perfiles metálicos.	104,98
	ml Refuerzo de viga o vigueta de hormigón armado, con perfiles metálicos.	15,57
CFRP	ml Refuerzo de muro o pilar de hormigón armado, con laminado de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	42,14
	m <sup>2</sup> Zunchado de pilar de hormigón armado, con hoja de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	90,29
	ml Refuerzo de vigas y viguetas, con laminado de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	41,59
	m <sup>2</sup> Refuerzo a cortante de vigas, con hoja de fibra de carbono MasterBrace "BASF".	90,29

Según esta tabla el coste del refuerzo con CFRP es menor en algunos elementos que los recrecidos de hormigón o perfiles de acero. Por ejemplo para un refuerzo de un pilar, el ml con refuerzo metálico es de 62,37 €, en recrecido de hormigón de 98,69 €, mientras que para CFRP es de 42,59 € por metro.

A estos costes hay que adicionarles los costes de mantenimiento, en un plazo mínimo de 50 años, muy superior en el caso de refuerzos metálicos y de Hormigón.

### 2.3 Aspectos sociales

Un aspecto de ineludible relevancia en el análisis de la sostenibilidad de una operación de refuerzo estructural, es la disminución de los impactos en las personas que puede conseguirse con los refuerzos de CFRP tanto en los usuarios de los edificios y de las infraestructuras durante la ejecución del refuerzo como en los operarios que lo ejecutan.

En los casos en los que no es necesario realizar operaciones de saneado previo, es decir, que no presenten patologías y se desee realizar una adecuación y puesta en valor del edificio, los refuerzos mediante CFRP se realizan con operaciones poco intrusivas, que no requieran de grandes volúmenes de demolición ni de acopio de material. Son obras ejecutadas en seco, sin la necesidad de agua,

exclusivamente una preparación y limpieza de la superficie con lijadoras o amoladoras provistas de aspiradoras de polvo, y con tiempos de ejecución muy cortos, por lo que no es preciso en la mayoría de los casos desalojar los edificios completamente y no disminuye la habitabilidad de los mismos.

Al no requerir de tantos medios auxiliares como en obras de recrecido de hormigón, no se interrumpe el uso del edificio o infraestructura, y disminuyen los riesgos de accidentes en los usuarios. En la mayoría de los casos de reparación de puentes, las obras se ejecutan sin la necesidad de cortes y desvío de tráfico.

Las obras son de menor impacto en el vecindario, reduciéndose la contaminación acústica y no deteriorando la calidad del aire, ya que se produce menor volumen de polvo y partículas en suspensión. Se reduce la producción de residuos, ya que los embalajes son de reducido volumen y totalmente reciclables.

Son soluciones que prácticamente no necesitan mantenimiento, son resistentes a la corrosión y a los ambientes agresivos, por lo que se reducen los costes de conservación a comunidades de vecinos y administración.

Además, por su ligereza y facilidad de montaje se reducen los riesgos laborales de los trabajadores. Son obras más seguras, con plazos de ejecución más reducidos, en las que trabajan operarios muy cualificados y más concienciados respecto a la seguridad y a la calidad de la ejecución.

### **2.3.1 El trabajo de las empresas más allá de la sostenibilidad técnica o económica.**

La investigación realizada ha incluido una serie de entrevistas a la empresa Azul Construcción, con el objetivo de, en una muestra de obras representativas realizadas en los últimos 20 años, analizar aspectos medioambientales y económicos, pero sobre todo comprobar la importancia de los aspectos sociales en este tipo de obras.

Azul Construcción es una empresa constructora andaluza con más de 25 años de experiencia reconocida a nivel nacional e internacional en la ejecución de obras de reparación y refuerzo de estructuras de hormigón y acero.

Empresa que desde su fundación apuesta por la innovación tecnológica y por proporcionar un servicio especializado, con una plantilla de profesionales muy formados, altamente cualificados y de gran experiencia en obras de refuerzo y reparación de estructuras.

Sus intervenciones se realizan con criterios de sostenibilidad, se estudian sistemas de refuerzo que resuelvan técnicamente las necesidades de la obra, y que a la vez no supongan un perjuicio para las personas, incidiendo en relación a los aspectos sociales en garantizar en todo momento la seguridad de sus trabajadores, de las personas, y evitando trastornos en el uso de edificios e infraestructuras.

La experiencia de la empresa en obras de infraestructuras de carreteras nos muestra una serie de acciones de carácter social, sin las cuales, su viabilidad se hubiera visto comprometida. En actuaciones en puentes y pasos a nivel las obras

normalmente han de realizarse sin cortar el tránsito, para evitar perjuicios en la actividad de las personas. Casos representativos que se mostrarán en el congreso son:

- Reparación en una pila del puente del FFCC de la línea Sevilla-Cádiz p.k. 005+778-vía I, sobre la SE-30 (Sevilla), cuya reparación y refuerzo se ejecutó al 100% sin necesidad de hacer cortes de tráfico y desviación de la circulación.
- Mejora del puente sobre el río Almanzora en la antigua C-323, Purchena, Almería, la inalterabilidad del CFRP aseguran la remodelación y adaptación de infraestructuras antiguas y puesta en valor de las mismas.
- Rehabilitación y refuerzo del puente de San Telmo, (Sevilla). Se realizaron reparaciones con morteros estructurales, inyecciones de fisuras con resinas y refuerzo con CFRP.
- Reparaciones y refuerzo del viaducto San Juan de Aznalfarache – Sevilla. En numerosas ocasiones en obras de puentes se encontraron personas viviendo debajo, como fue este caso, debiendo respetar en todo momento sus edificaciones, construyendo campos de fútbol, o incluso creando escuelas taller para darles trabajo en la propia obra.

Es representativo el caso de la intervención efectuada en un paso inferior del ferrocarril sobre una carretera en Ndjolé (Gabón), lugar de difícil acceso y con escasas infraestructuras, en el que se ejecutaron las obras sin necesidad de cortar sendas vías, lo que hubiera supuesto aislar dos ciudades y desviar el tráfico por carreteras alternativas con incrementos de distancias de desplazamientos de 40 Km o más, y el corte del tren como principal transporte de mercancías.

### **3. La importancia del control de calidad en la amortización de impactos**

La calificación de la sostenibilidad de los refuerzos de CFRP pasa por el estudio de una adecuada aplicación que garantice su durabilidad, por ello es fundamental realizar un correcto programa de control de calidad.

Existen en normas como la UNE EN 1504-10 y ACI 440.2R-08 y publicaciones como el DIT n° 572R/16 sobre el sistema de refuerzo de estructuras de hormigón armado (Sistema MasterBrace) de BASF, se recogen diferentes criterios y parámetros a tener en cuenta en el control de calidad, como son el control de fabricación, el control de recepción y el control de la puesta en obra con las siguientes indicaciones:

- 1.1. El hormigón deberá presentar una resistencia a la tracción superficial mayor o igual a 1,5 MPa (Pull-off) según UNE-EN 1542:2000.
- 1.2. Se requiere unas condiciones climatológicas durante su aplicación, y humedad superficial del soporte inferior al 4%.

- 1.3. Se recomienda preparación del soporte con patrones de textura recomendados (CSP 4 a CSP 6) por el International Concrete Repair Institute (ICRI).

En estos documentos se definen, en mayor o menor grado, parámetros y ensayos para un Control de Calidad a ejecutar durante la colocación del refuerzo y a lo largo de su vida útil. Si bien, se trata de ensayos puntuales y destructivos, no aplicables a una gran extensión del refuerzo y, por tanto, que no pueden asegurar con la suficiente confianza la calidad y durabilidad del mismo.

Detectada esta carencia en manuales, normativas, recomendaciones e investigaciones actuales, en el proyecto de investigación NUREMCO y en estudios posteriores del grupo de investigación PAIDI TEP-954 de la Universidad de Sevilla y la empresa LABRUM, se ha diseñado un Plan de Control de Calidad para el refuerzo de estructuras con materiales compuestos que asegure su calidad, efectividad, correcto funcionamiento y durabilidad, con el objetivo del empleo extensivo de ensayos no destructivos correlacionados con ensayos destructivos.

Durante este estudio se realizaron una serie de probetas prismáticas con dos tipos de hormigones, a las que les aplicó un refuerzo de CFRP con diferentes rugosidades superficiales y diferentes ambientes de curado (humedad y temperatura).

Los ensayos para valorar la calidad del refuerzo han de ser por un lado los encaminados a la localización de posibles imperfecciones y bolsas de aire en el CFRP a través de la termografía infrarroja y en ensayos de ultrasonidos (Figura 1).



**Fig. 1** Ensayos no destructivos de termografía infrarroja y ultrasonidos realizados en probetas

Y por otro lado, ensayos para el control de la adhesión tipo Pull Off, Shear Torsion y de resistencia a Flexión (Figura 2).



**Fig. 2** Ensayos destructivos Pull Off y Shear Torsion realizados en probetas

La realización de un adecuado Control de Calidad del refuerzo de CFRP garantizará su durabilidad, aumentando la vida útil y la amortización de los impactos producidos en las fases de producción y colocación (Vilches, 2014).

El control de calidad debe realizarse en las fases de Estudios Previos a la redacción de proyecto, Redacción del Proyecto de ejecución, Ejecución del refuerzo en obra, así como en los proyectos de Operaciones de mantenimiento.

#### **4. Conclusiones**

Son escasos los estudios, investigaciones y referencias bibliográficas sobre protocolos de control de calidad y ACV en refuerzos de estructuras de hormigón armado con CFRP.

En esta ponencia se realiza un análisis de la sostenibilidad de este tipo de refuerzos considerando la puesta en obra, impactos medioambientales y en las personas, hasta aspectos relacionados con el control de calidad de la ejecución.

La valoración comparativa efectuada sobre el consumo de energía en el ciclo de vida entre los refuerzos ejecutados con CFRP y otros, pone de manifiesto el menor impacto de éstos, siendo además comparativamente menor el coste global de ejecución y mantenimiento. El reducido volumen de material y de residuos que se producen, unidos a la reciclabilidad de los productos, sitúan a estos sistemas entre los más sostenibles.

Atendiendo a los aspectos sociales, se puede afirmar que los refuerzos mediante CFRP son mucho más sostenibles por el menor impacto de las obras en los vecinos y en los operarios. En obras de edificación no es preciso proceder al desalojo, reduciendo trastornos en las personas e incrementos de coste por realojo. En obras de infraestructuras no es preciso cortar el tráfico o desviarlo, reduciendo el trastorno en las comunidades. Al ser materiales ligeros y no precisar de tantos medios auxiliares se reducen los riesgos de accidentes laborales. La mano de obra suele ser más especializada que en otros sistemas de refuerzo, y con mayor concienciación de la necesidad de respetar medidas de seguridad y los controles de calidad.

Estas conclusiones son válidas siempre y cuando se garantice la durabilidad del refuerzo, siendo fundamental asegurar la adecuada aplicación del refuerzo mediante la realización de un control de calidad programado que asegure una amplia vida útil con limitado coste de mantenimiento, y una mayor amortización de los impactos por año.

#### **5. Citas y Referencias**

- ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (2008)
- Basf-Constructions (2011) Recomendaciones para el diseño de planes de control de calidad en ejecución de refuerzos con fibra de carbono. Basf Construction, Barcelona.
- Basf-Constructions (2012) Norma europea EN 1504. Guía simplificada ilustrada para todos los profesionales del sector de la reparación de hormigón. Basf Construction, Barcelona.

- Howarth J, Mareddy S, Mativenga, PT (2014) Energy intensity and environmental analysis of mechanical recycling of carbon fibre composite. *Journal of Cleaner Production* 81: 46-50
- Instituto Valenciano de la Edificación IVE (2008) Experiencia en Inspección de estructuras en edificios. Comunidad Valenciana 1991-2008. Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, Valencia.
- Instituto Valenciano de la Edificación IVE (2008) Guía para la Inspección y Evaluación Preliminar de estructuras de hormigón en edificios existentes. Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, Valencia.
- Jiang L et al (2015) Recycling carbon fiber composites using microwave irradiation: Reinforcement study of the recycled fiber in new composites. *J. Appl. Polym. Sci* 132(41)
- Keith MJ, Oliveux G, Leeke GA (2016) Optimisation of solvolysis for recycling carbon fibre reinforced composites. Paper presented at the 17th European Conference on Composite Materials, University of Munich, Germany, 26-30 June 2016.
- Lago C et al (2007) Análisis del ciclo de vida de combustibles alternativos para el Transporte. CIEMAT, Madrid
- Maña i Reixach F, Bellmunt et al. (2005) Recomendaciones para el reconocimiento sistemático y la diagnosis rápida de forjados contruidos con cemento aluminoso. ITC, Barcelona
- Muñoz Marzá, Carlos; Vilar, Maite; Garraín Cordero, Daniel. Evolución del impacto medioambiental de los retrovisores de vehículos. Evaluación mediante análisis del ciclo de vida. 2008.
- Osorio Cardona JF (2011) El consumo sostenible de los materiales usados en la construcción de vivienda: la perspectiva sistémica. Dissertation, Universidad Nacional de Colombia
- Pereira, JJMG (2015) Bases de trabalho para a avaliação do ciclo de vida de vigas em betão armado reforçadas com laminados de CFRP de acordo com as técnicas EBR e NSM.
- Río Bueno A (2008) Patología, reparación y refuerzo de estructuras de hormigón armado de edificación. UPM, Madrid.
- Rivarola A, Torres L, Rivarola AM, Berrios G, Gardey MC, Gatica P. (2011) Estudio y comparación de alternativas de fin de vida aplicadas a palas de aerogeneradores, empleando metodología de análisis de ciclo de vida.
- Serrano Lanzarote B (2014) IEE.CV Informe de Evaluación del Edificio, Comunitat Valenciana, Guía de Inspección. Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, Valencia
- Sika (2007) Procedimiento de aplicación. Sistemas de refuerzos de estructuras. Sika AG, Madrid
- Song Young S, Youn Jae R, Gutowski, TG (2009) Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40(8): 1257-1265
- Tjibaou C, Piano R. Sostenibilidad en la edificación. Centro Cultural Jean Marie Tjibaou.
- UNE EN 1504 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón (2006)
- Vilches Such, A; Lizana-Moral, FJ; Barrios-Padura, A; Díaz-heredia, I; Serrano-Jiménez, AJ. (2014). Responsible management of construction resources. Amortization of the concrete's embodied environmental impact as a sustainable strategy. World Sustainable Building Conference 2014. Barcelona, Spain.

## 6. Agradecimientos

Agradecimientos al Proyecto de Investigación Nuremco financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro del Programa Feder Interconecta. Además, al V Plan Propio de Investigación de la Universidad de Sevilla y a la empresa Azul Construcción.