

Trabajo Fin de Grado

Avances Técnicos Aplicados a la Rehabilitación de Edificios : Refuerzo estructural con FRP

Autor/es

Ana Carmen Guíu Castillo

Director/es

Begoña Genua Díaz de Tuesta

Escuela de Ingeniería y Arquitectura / Universidad de Zaragoza
2015-2016



(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Ana Carmen Guíu Castillo,

con nº de DNI 73009787 J en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado, (Título del Trabajo)

Avances Técnicos Aplicados a la Rehabilitación de Edificios :
Refuerzo estructural con FRP

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 24 de Noviembre de 2016

Fdo: Ana Carmen Guíu Castillo

AVANCES TÉCNICOS APLICADOS A LA REHABILITACIÓN DE EDIFICIOS.

Refuerzo estructural con FRP

RESUMEN

Actualmente, según datos del Ministerio de Vivienda, más de la mitad del parque edificado es anterior a 1980 y casi el 21% cuentan con más de 50 años. Este gran parque inmobiliario necesita diversas actuaciones de intervención, bien sea para certificar la seguridad o para permitir adaptar su uso a nuevas necesidades, por lo que el campo de la rehabilitación se presenta como una consistente vía de reactivación del sector de la construcción.

Al plantear el tema de la rehabilitación de la estructura estamos incidiendo en la parte de mayor entidad del edificio, ya que, como es evidente, la función principal de los elementos estructurales es la de soporte del edificio del que forman parte. A este respecto, los avances tecnológicos procedentes, en muchos casos, de otros sectores pueden ser de gran ayuda, como es el caso de los materiales compuestos o polímeros reforzados.

El uso de estos nuevos materiales como refuerzo para estructuras ya construidas es una de las tecnologías que están teniendo una gran aceptación en la industria de la construcción debido a que poseen ciertas propiedades que hacen que su uso pueda resultar potencialmente ventajoso frente a materiales tradicionales como el hormigón o el acero.

A través del estudio de dichas propiedades y de varias obras donde se hace uso de los FRPs, se pretende dar una visión global sobre las ventajas y desventajas de los mismos, con la intención de generar una serie de conocimientos sobre estos nuevos sistemas de refuerzo para poder aplicarlos con criterio cuando tengamos que enfrentarnos a un proyecto de rehabilitación estructural.

ÍNDICE

01 INTRODUCCIÓN

- 01.1 Objetivos y elección del tema 05
- 01.2 Metodología del trabajo 06
- 01.3 Estructura del trabajo 06

02 LA REHABILITACIÓN EN EL CONTEXTO ACTUAL

- 02.1 La necesidad de rehabilitar 09
- 02.2 Estudio de la normativa 11

03 REFUERZO ESTRUCTURAL

- 03.1 Métodos de reparación 15
- 03.2 La elección del material 19
- 03.3 Los materiales compuestos: del adobe al FRP 20

04 MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA (FRP)

- 04.1 Origen 25
- 04.2 Composición 27
 - 04.2.1 Matrices 27
 - 04.2.2 Fibras 28
- 04.3 Los FRP en la construcción 33
 - 04.3.1 Productos 35
 - 04.3.2 Campos de aplicación 38
 - 04.3.3 Modos de colapso 43
- 04.4 Comparación con sistemas de refuerzo tradicionales 44

05 CASOS PRÁCTICOS

- 05.1 Casa Yamanura, Prefectura de Hyōgo (Japón) 48
- 05.2 Torre campanario de Alcalá de Xivert, Valencia 56
- 05.3 Palacio Lely, L'Aquila (Italia) 62
- 05.4 Edificios afectados por explosión de gas, Palencia 66
- 05.5 Biblioteca de la universidad de Deusto, Bilbao 72

06 CONCLUSIONES

79

07 BIBLIOGRAFÍA

83

01

INTRODUCCIÓN

01.1

OBJETIVOS Y ELECCIÓN DEL TEMA

El presente trabajo tiene por objeto el estudio de los nuevos sistemas de refuerzo y consolidación de estructuras con materiales compuestos por fibras con matriz orgánica (FRP, como son conocidos por sus siglas en inglés) o polímeros armados con fibras.

Se trata de conocer las distintas formas en las que podemos encontrar estos nuevos materiales y las ventajas que pueden aportar en el campo de la rehabilitación frente a la utilización de otros materiales más conocidos como el hormigón y el acero.

Los FRP (*Fiber Reinforced Polymer*) se desarrollaron inicialmente para la industria aeroespacial, pero gracias a sus características han sido empleados exitosamente en otros ámbitos como la industria naval, automovilística, en equipamientos deportivos y ahora en la construcción.

El uso de estos nuevos materiales como refuerzo para estructuras ya construidas es una de las tecnologías que están teniendo una gran aceptación en la industria de la construcción debido a que poseen ciertas propiedades que hacen que su uso pueda resultar potencialmente ventajoso frente a materiales tradicionales como el hormigón o el acero. Entre esas propiedades se encuentra la alta relación resistencia-peso que mejora el comportamiento de la estructura existente sin alterar su configuración geométrica. Asimismo son especialmente adecuados para el caso de construcciones en las que existan problemas potenciales de corrosión o ataques químicos, ya que presentan una alta resistencia a la corrosión.

Pero a pesar de haber demostrado sus altas prestaciones y una elevada fiabilidad, existen algunos aspectos que limitan su uso. En primer lugar, su elevado precio, muy superior al del acero (al menos, por unidad de peso), aunque el coste de estos materiales está bajando en los últimos años al incrementarse su producción y desarrollarse métodos de fabricación más eficaces.

El escaso conocimiento que aún hoy en día se tiene de estos materiales y la falta de normativa aplicable es otro aspecto que limita su utilización y hace que a menudo se opte por el uso de materiales tradicionales más conocidos pero probablemente no los más convenientes para un elevado número de aplicaciones en construcción.

La elección de este tema vino propiciada por la convicción personal de que un mayor conocimiento de estas técnicas puede mejorar las soluciones aportadas ante los proyectos de conservación, rehabilitación y restauración de edificios, ya que en el momento actual, este campo constituye una parte verdaderamente esencial de la actividad profesional en España y, en general, en toda Europa.

01.2 METODOLOGÍA DEL TRABAJO

Después de haber decidido el tema de la investigación y centrado la búsqueda de los avances técnicos en el uso de los nuevos materiales FRP, se procedió a una labor de recopilación de información cuyas fuentes pueden encontrarse en el apartado de bibliografía al final del documento. En un primer momento, esta búsqueda se realizó en dos vías: por una lado, se centraba en cuestiones de restauración y rehabilitación de la arquitectura con el fin de conocer su evolución a lo largo de la historia y su trascendencia en el panorama actual. Paralelamente, se buscó información técnica capaz de explicar en profundidad las características de los nuevos materiales sobre los que iba a versar el trabajo.

En este caso, la mayor fuente de información fueron los diversos artículos publicados en las revistas *Materiales de Construcción e Informes de la Construcción*, ambas editadas por el CSIC y disponibles libremente a través de su página web. También resultaron de gran utilidad los catálogos comerciales de las diferentes marcas fabricantes de productos FRP, que igualmente se pueden consultar a través de la web.

Desde la red también tuve acceso a diferentes publicaciones y documentos universitarios, como trabajos finales de master, que analizaban teóricamente el comportamiento de elementos estructurales reforzados con materiales compuestos por fibras y sometidos a diferentes esfuerzos.

Una vez recopilada y comprendida toda esta información, se pasó a la búsqueda de proyectos de rehabilitación en los que se emplearan estos nuevos materiales. Esta tarea resultó ser la más complicada, ya que la relativa novedad y el elevado coste de estos materiales hace muy complicado el paso del proyecto a la realidad.

Debido a la escasa información encontrada en la red, procedí a contactar directamente con los autores de dichos proyectos o agentes involucrados en las actuaciones de rehabilitación. Aunque la información aportada por estos profesionales no siempre resultó muy detallada, es de agradecer la buena disposición y amabilidad de todos ellos.

01.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO

Partiendo de una primera reflexión sobre la necesidad de la rehabilitación en el contexto actual, se hace un breve estudio de la normativa española y europea aplicable en esos casos.

De entre los diferentes elementos a rehabilitar, el trabajo se centra en el refuerzo estructural. En primer lugar se habla sobre los métodos de refuerzo estructural y de la elección del material, donde se presentan los nuevos materiales compuestos.

Se da una primera aproximación a estos nuevos materiales y a la forma en que pueden trabajar en el refuerzo estructural para, posteriormente, hacer un estudio más detallado de sus características, su composición, el formato en el que nos los podemos encontrar en el mercado y la manera de aplicarlos para solucionar los fallos estructurales.

Una vez asimilada toda esta información y gracias al análisis de varias obras de rehabilitación donde el empleo de los nuevos materiales tiene gran relevancia, se extraen una serie de conclusiones que serán el objetivo final de este trabajo.

02

LA REHABILITACIÓN EN EL CONTEXTO ACTUAL

02.1

LA NECESIDAD DE REHABILITAR

A finales del siglo XVIII la sensibilización hacia la protección del patrimonio monumental comenzó a desarrollarse gracias a los movimientos ilustrados que pusieron de manifiesto el valor de la historia y a los monumentos como testigos mudos de este reconocimiento. Aparecieron las primeras formulaciones explícitas sobre el valor documental e histórico de la arquitectura y la necesidad de su conservación y transmisión a las generaciones futuras. Pero no fue hasta unas décadas después, más concretamente a mediados del siglo XIX, cuando la restauración arquitectónica nació como hecho cultural propio de la arquitectura, con la denominada “restauración estilística” enunciada por Viollet-le-Duc, que se convirtió en la primera teoría de restauración que reconocía esta práctica como una disciplina autónoma y separada de la arquitectura de nueva planta.

Desde entonces hasta hoy han surgido varias teorías y metodologías que se han ido recogiendo en diversas Cartas y normativas nacionales e internacionales, centradas especialmente en regular cómo debe procederse a la hora de acometer un proyecto de restauración.

Estas pautas tomaron carácter de legalidad con la promulgación de varias leyes en España. La primera Ley de Patrimonio Artístico, de 1933, fue reemplazada por la Ley de Patrimonio Histórico Español de 1985. A partir de ese año, y a medida que se iban produciendo las transferencias a las Comunidades Autónomas en materia de patrimonio, se han ido aprobando las correspondientes leyes autonómicas.

En los primeros años de la Democracia, la rehabilitación recibió un gran impulso que se ha ido frenando hasta paralizar con la actual crisis económica. Hoy en día, esta situación de crisis que viene soportando el urbanismo actual por el agotamiento del modelo especulativo de consumo de suelo, ha originado el auge de iniciativas públicas y privadas dirigidas a la rehabilitación. Estas actuaciones comparten con el concepto de restauración arquitectónica el hecho de conservación del patrimonio edificado, pero sus razones para hacerlo son muy diferentes. Mientras que la restauración se orienta hacia la conservación del patrimonio singular y monumental, los trabajos de rehabilitación van dirigidos a devolver la utilidad a los edificios conservando o modificando su uso anterior e iniciando de este modo un nuevo ciclo de vida. Se centran en un patrimonio más modesto, más abundante y con mayor presencia territorial y, en la mayoría de los casos, sin protección patrimonial.

De modo que con la rehabilitación se evita la especulación derivada de la nueva construcción, a la vez que se conserva el patrimonio existente que, de otro modo, quedaría en desuso.

Otro aspecto a tener en cuenta a la hora de valorar la importancia de la rehabilitación en el contexto actual es su alcance económico. Tanto a corto, como a medio plazo, será muy difícil que los sectores inmobiliario y de la construcción puedan contribuir al crecimiento de la economía española y a la generación de empleo si continúan basándose, principalmente y con carácter general, en la transformación urbanística de suelos vírgenes y en la construcción de vivienda nueva.

Actualmente, según datos del Ministerio de Vivienda, más de la mitad (el 55%) del parque edificado, que asciende a más de 25 millones de viviendas, es anterior al año 1980 y casi el 21% cuentan con más de 50 años. Este gran parque inmobiliario necesita diversas actuaciones de intervención, bien sea para certificar la seguridad o para permitir adaptar su uso a nuevas necesidades, por lo que el campo de la rehabilitación se presenta como una consistente vía de reactivación del sector de la construcción.

02.2

ESTUDIO DE LA NORMATIVA

En marzo de 2006, el Gobierno aprobó la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación con los objetivos de mejorar la calidad de la edificación, y de promover la innovación y la sostenibilidad. A través de esta normativa se da satisfacción a ciertos requisitos básicos de la edificación relacionados con la seguridad y el bienestar de las personas, que se refieren, tanto a la seguridad estructural y de protección contra incendios, como a la salubridad, la protección contra el ruido, el ahorro energético o la accesibilidad para personas con movilidad reducida.

En el año 2013 se realizó una actualización de este documento en relación al ahorro energético para adaptarse a los requerimientos europeos que buscan conseguir que todos los edificios nuevos tengan un consumo casi nulo para el año 2020.

La aprobación del CTE supuso la superación y modernización del anterior marco normativo de la edificación en España que establecía las Normas Básicas de la Edificación (efectivas desde 1979) como disposiciones de obligado cumplimiento en el proyecto y la ejecución de los edificios.

Estas exigencias afectan en gran medida a los edificios de nueva construcción, aunque la obligatoriedad de su cumplimiento en materia de rehabilitación no está tan clara. En el artículo donde se especifica su ámbito de aplicación se indica que *“el Código Técnico de la Edificación se aplicará también a intervenciones en los edificios existentes”*, pero en el párrafo siguiente puntualiza *“Cuando la aplicación del Código Técnico de la Edificación no sea urbanística, técnica o económicamente viable o, en su caso, sea incompatible con la naturaleza de la intervención o con el grado de protección del edificio, se podrán aplicar, bajo el criterio y responsabilidad del proyectista o, en su caso, del técnico que suscriba la memoria, aquellas soluciones que permitan el mayor grado posible de adecuación efectiva”*¹.

Igualmente, en el caso de rehabilitación estructural que es el caso que nos ocupa en este trabajo, el documento señala que *“no es adecuada la utilización directa de las normas y reglas establecidas en este CTE en la evaluación estructural de edificios existentes, construidos en base a reglas anteriores a las actuales para los edificios de nueva construcción”*². Por lo que en cuestiones de rehabilitación todo queda en manos del buen hacer del proyectista o técnico.

Para ayudar en esa tarea existen algunas normas europeas como la UNE-EN 1504 que tiene por título: *Productos y sistemas para la reparación y protección de estructuras de hormigón*. Se centra en el caso concreto del hormigón armado ya que desde que se utilizó por primera vez a finales del siglo XIX, se ha convertido en el material de construcción más utilizado.

Esta norma europea fue implantada plenamente por los miembros del CEN³ (organismos nacionales de normalización de los 28 países europeos) el 1 de enero de 2009. A todas las partes de la norma europea se les ha concedido la categoría de norma nacional en cada uno de los países individuales y las normas nacionales en conflicto fueron retiradas al final del período de coexistencia, es decir, no más tarde de diciembre de 2008.

¹ Artículo 2 del Capítulo 1, Parte I del Código Técnico de la Edificación. 2013

² D.1.2 dentro del Anejo D Evaluación estructural de edificios existentes. DB-SE. Parte II del CTE. 2009

³ Países miembros: Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Chipre, República Checa, Croacia, Dinamarca, Eslovaquia, Eslovenia, España, Estonia, Finlandia, Francia, Grecia, Hungría, Islandia, Irlanda, Italia, Letonia, Lituania, Luxemburgo, Macedonia, Malta, Países Bajos, Noruega, Polonia, Portugal, Reino Unido, Rumanía, Suecia, Suiza y Turquía.

Consta de 10 apartados donde se definen los trabajos de evaluación y diagnóstico requeridos, los productos necesarios y los sistemas incluyendo su comportamiento, los procedimientos alternativos y métodos de aplicación, junto con el control de calidad de los materiales y los trabajos.

La parte 9 de esta norma se centra en los principios y métodos de protección y reparación, que están basados en los mejores procedimientos y técnicas que demuestran un historial de aplicación con éxito durante muchos años. Están agrupados en 11 principios relacionados con la degradación de la matriz de hormigón, o con los defectos causados por corrosión de la armadura.

En el cuarto de estos principios es donde se hace referencia al refuerzo estructural, definiéndolo como *“incremento o restauración de la capacidad portante de un elemento de la estructura de hormigón”*. Este principio recoge 7 métodos con los que conseguir ese incremento de la capacidad portante, entre los que se tiene en cuenta el uso de los nuevos materiales FRP debido al éxito que han demostrado en sus aplicaciones en obras de rehabilitación de edificios e infraestructuras.

Aunque en nuestro país no existen normativas específicas sobre el empleo de FRP, si que existen varias guías de diseño y construcción gracias al creciente uso que han experimentado estos materiales en la rehabilitación y reparación de estructuras de hormigón. Estas guías se desarrollaron en algunos países donde el uso de materiales FRP esta más extendido, como en Estados Unidos con la ACI440.2R-08; la JSCE-1997 en Japón; los Standard S806-02 y CAN/CSA-S6-00 en Canadá; FPI-CEB-2001 en Suiza; o la CNR DT 200/2004 en Italia.

03

REFUERZO ESTRUCTURAL

03.1 MÉTODOS DE REPARACIÓN

La reparación correcta de una estructura comienza por una evaluación de su estado y por la identificación de la causa de la degradación. Todas las demás fases del proceso de reparación y protección dependen de estos dos puntos.

Al plantear el tema de la rehabilitación de la estructura estamos incidiendo en la parte de mayor entidad del edificio, ya que, como es evidente, la función principal de los elementos estructurales es la de soporte del edificio del que forman parte ante las acciones exteriores que ponen en peligro la estabilidad. Estas acciones son esencialmente, las cargas que recibe o produce el edificio, que pueden ser verticales u horizontales, permanentes o temporales, estáticas o dinámicas y que, con carácter general, podemos agrupar en exteriores (viento, nieve y sismos) e interiores (peso propio de la construcción, el generado por su uso y las cargas térmicas consecuencia de dilataciones y contracciones de cualquiera de los elementos constructivos).

Los procesos patológicos más inmediatos que pueden sufrir las estructuras serán aquellos causados por esas acciones mecánicas. Sin embargo, además de esos, aparecen otros procesos patológicos de tipo físico o químico, sobre todo en los casos en los que los elementos estructurales están en contacto con el exterior, y por tanto, sometidos a los agentes atmosféricos y a la contaminación ambiental. Estas lesiones físicas y químicas actúan principalmente sobre la piel de los elementos estructurales, pero en algunos casos pueden llegar a afectar a su capacidad resistente, como es el caso de la corrosión, que afecta a las armaduras del hormigón.

Las acciones mecánicas, físicas o químicas no son las únicas causas que pueden originar el inicio de los procesos patológicos. Estos pueden ser debidos a errores de proyecto o construcción y constituyen un gran peligro ya que, además de provocar el desgaste del material, y por tanto la disminución de su capacidad portante, también favorecen la entrada de aire y agua, hecho que puede dar lugar a la aparición de patologías de tipo físico o químico.

De los tres tipos de procesos patológicos, los que cobran más importancia en lo que respecta a la estructura del edificio son los procesos mecánicos. Estos surgen como consecuencia de la función soporte de los elementos estructurales, afectando a la integridad del conjunto, y como veremos más adelante, es en estos casos, en los que la estructura ha sufrido patologías de carácter mecánico, donde mayores ventajas aportan los nuevos materiales compuestos de matriz polimérica (FRP).

En cuanto a las técnicas de reparación estructural, pueden ser tan variadas como lo son los materiales y elementos constructivos, así como los procesos patológicos que pueden acontecer, por ello no es posible estudiar todas las técnicas a emplear. En este apartado se pretende, por tanto, ofrecer tan solo una perspectiva general de los métodos y sistemas que, habitualmente, son más empleados para la reparación y refuerzo de estructuras.

A lo largo de su vida de servicio, las estructuras son susceptibles de sufrir diversas incidencias que pueden hacer necesaria una intervención más o menos intensa. Estas intervenciones van encaminadas principalmente a recuperar su aspecto o reponer su capacidad mecánica original en el caso de las reparaciones; o a incrementar la misma en el caso de los refuerzos.

Las reparaciones suelen ser necesarias cuando el material estructural presenta problemas de durabilidad (como en el caso de corrosión de las armaduras en las estructuras de hormigón), o a consecuencia de las cargas de servicio u otras causas accidentales (como el caso de impactos en puentes de carretera).

En cuanto a los refuerzos, suelen ser originados a consecuencia de una característica del material poco adecuada, de errores en la definición de las acciones consideradas en el proyecto, o a consecuencia de un cambio en las características de las acciones que actúan sobre la estructura. En cualquier caso, se deberá resolver primero la anulación de las causas antes de arreglar la lesión y recuperar el estado original del elemento constructivo, de lo contrario, podemos encontrarnos de nuevo con la lesión en un breve plazo.

Según la gravedad de la lesión que afecta a la estructura, podemos clasificar las intervenciones en tres grupos:

Inyección de fisuras

Suelen afectar únicamente a la parte exterior del elemento estructural, por lo que si se corrigen a tiempo, no suponen un riesgo para la estabilidad del edificio. Su ejecución es relativamente sencilla, mediante el sellado de dicha fisura con morteros o resinas a baja o alta presión.

Refuerzos

Dentro de la dificultad de las intervenciones, los refuerzos se sitúan en un papel intermedio, ya que son necesarios para mantener la capacidad portante de la estructura pero no requieren la eliminación, ni total ni parcial, de la estructura existente.

Las técnicas más comunes a la hora de realizar el refuerzo de una estructura son el empleo de una estructura auxiliar, el recrecido de secciones con hormigón, la incorporación de armaduras, bandas o chapas metálicas; u otras técnicas como el postesado y pretensado exteriores, los cosidos locales, etc.

Algunos métodos como el refuerzo externo de las estructuras mediante chapas metálicas se ha estudiado desde los años sesenta del siglo pasado, y su uso se ha extendido mucho durante las dos últimas décadas. Sin embargo, otros como la utilización de polímeros para reforzar las estructuras de hormigón es, en cambio, una práctica relativamente reciente y que puede aportar grandes ventajas frente a estos métodos más conocidos.

Sustitución física

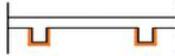
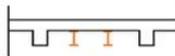
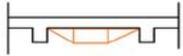
Cuando los elementos estructurales se encuentran muy dañados o las condiciones del proyecto hacen inviable la realización de un refuerzo, lo más razonable es optar por la sustitución física del elemento o parte del elemento que no cumple los requisitos de seguridad necesarios.

La sustitución parcial se realiza cuando únicamente una parte del elemento de la estructura se encuentra tan dañado que no es posible conservarlo en ese estado, ya que contribuiría al deterioro completo y rotura del elemento.

Un ejemplo de este caso lo podemos encontrar en vigas de madera cuya cabeza se ha visto gravemente afectada por la humedad. Al tratarse de una zona muy delimitada, se procede a la eliminación de dicha zona y su reconstrucción con un material moldeable. El punto más delicado en estas operaciones se encuentra en el anclaje y conexión de la parte reintegrada con el elemento original. Para ayudar a que ambas partes se unan solidariamente suele emplearse varillas de fibra de vidrio y, al igual que en los otros modos de reparación, habrá de tenerse en cuenta la compatibilidad entre los diferentes materiales.

En los casos extremos en los que no existe ninguno de los elementos estructurales o estos están tan deteriorados que resultan inservibles, se opta por la sustitución total colocando un nuevo elemento con una capacidad portante igual o superior al anterior.

Pilares (flexión o compresión)	
Zunchado	Recrecido
	
<ul style="list-style-type: none"> -Necesidad de medios auxiliares -Tiempo -Su éxito depende de la puesta en obra -Posibles problemas de corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> -Mano de obra poco especializada -- Gran cantidad de tiempo y métodos auxiliares

Forjados y Vigas (esfuerzo a flexión)				
Recrecido en capa de compresión	Recrecido en nervios entre pilares	Perfiles	Chapas	Pretensados
				
<ul style="list-style-type: none"> -Necesidad de medios auxiliares -Tiempo -Buena solución para incrementos de carga en forjados --Posibles problemas de rasantes -- Posibles problemas de alturas libres 	<ul style="list-style-type: none"> -Necesidad de medios auxiliares -Tiempo -Buena solución para incrementos de carga en forjados -Posibles problemas de alturas libres 	<ul style="list-style-type: none"> -Gran capacidad de refuerzo -Necesidad de medios auxiliares -Tiempo de ejecución -Su éxito depende en gran medida de la puesta en obra -Necesidad de protección contra la corrosión -Posibles problemas por alturas libres 	<ul style="list-style-type: none"> -Capacidad de refuerzo limitada por la deformación máxima -Necesidad de medios auxiliares -Necesidad de protección frente a la corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> -Gran capacidad de refuerzo -Necesidad de medios auxiliares -Necesidad de protección contra la corrosión y contra agentes externos



03.2

LA ELECCIÓN DEL MATERIAL

La selección de materiales en arquitectura no es un tema baladí; existen varios criterios que deberemos tener en cuenta a la hora de escoger un material como las propiedades tecnológicas que nos ofrece, los aspectos relacionados con su fabricación y puesta en obra, los económicos, los aspectos ambientales, y también aquellos criterios relacionados con el diseño arquitectónico, con la expresividad del material.

Cuando se trata de obras de rehabilitación, en algunos casos, las estructuras de los edificios a reparar tendrán condiciones de construcción distintas a las habituales hoy en día. En ocasiones, esas técnicas han desaparecido y se han perdido las enseñanzas que se transmitían de generación en generación por vía oral y práctica, y en otros casos son económicamente imposibles de llevar a cabo. Por lo tanto, a la hora de acometer un proyecto de rehabilitación deberemos prestar gran atención a los materiales y sistemas constructivos que vayamos a emplear para que no se produzcan incompatibilidades ni rechazos entre lo viejo y lo nuevo, no sólo visuales sino especialmente químicas.

Un ejemplo ampliamente estudiado de estas incompatibilidades son las mezclas de cemento portland y yeso, que al juntarse producen la formación de etringita, que causa expansiones y conduce al deterioro rápido del material.

Los materiales más habituales a la hora de realizar refuerzos estructurales son el hormigón armado (con el recrecido de secciones) o el acero (con la incorporación de armaduras y chapas o como estructura auxiliar). Pero hay ocasiones en las que condiciones del proyecto hacen inviable su utilización (por ejemplo, el uso de aceros en ambientes agresivos), o son necesarios materiales con mayores capacidades portantes o características especiales.

Es entonces cuando los nuevos materiales pueden ser de gran utilidad, y en algunos casos, pueden ser la única solución frente al derribo del edificio. El refuerzo de estructuras de hormigón armado mediante materiales compuestos, en especial mediante polímeros reforzados con fibras (FRP), tiende a sustituir a sistemas de intervención más tradicionales, como los refuerzos mediante encolado de bandas de acero aportando grandes beneficios.

En ocasiones, los nuevos materiales suponen una evolución tecnológica de estos materiales tradicionales (como puede ser el caso de hormigones de altas capacidades o de metales con aleaciones que le otorgan grandes resistencias mecánicas y frente a la oxidación) y, por lo tanto, no cambiarán los sistemas constructivos a emplear. Sin embargo, en otros casos, estos nuevos materiales provienen de sectores industriales donde llevan años demostrando sus propiedades, y su utilización en el sector de la construcción implica la aparición de un nuevo producto y de un nuevo sistema constructivo.

Este es el caso de los materiales compuestos por fibras con matriz polimérica (FRP) que, como se explicará más adelante, se introducen en el sector de la construcción mediante nuevos productos como láminas o tejidos y que vienen aparejados a nuevas formas de aplicación.

03.3

LOS MATERIALES COMPUESTOS: DEL ADOBE AL FRP

Como se ha explicado anteriormente, los materiales son elementales en muchos sectores. Han sido tan importantes en la vida del hombre que los historiadores han clasificado las primeras edades de la humanidad según los materiales que cada sociedad ha desarrollado; así han surgido varias etapas históricas: las edades de la Piedra, del Bronce y del Hierro.

No obstante la historia, como el desarrollo de materiales, no se detiene. Normalmente, la aparición de un nuevo material se debe al empleo de un nuevo proceso y/o a la demanda de nuevas aplicaciones. Las eras más recientes se han caracterizado por el uso de materiales como el sílice o los polímeros, y en la actualidad, se están imponiendo los materiales compuestos, o composites.

Un material compuesto se puede definir como un sistema integrado por una mezcla o combinación de dos o más materiales diferentes diseñada para desempeñar una función específica, maximizando las propiedades deseables de sus componentes y minimizando las que no lo son. Esto hace que sus propiedades mecánicas sean superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes, es decir, que se produzca sinergia entre dichos componentes.

Para que una material se considere compuesto, debe cumplir ciertas características como que sus componentes no deben disolverse ni fusionarse completamente entre ellos, es decir, los materiales deben poderse identificar por medios físicos, ya que son heterogéneos. El hecho de que los materiales compuestos sean heterogéneos muchas veces hace que también sean anisotrópicos (sus propiedades dependen de la orientación del material de refuerzo), por lo que sus propiedades no son las mismas en todo su volumen.

En estos materiales, el componente mayoritario desempeña el papel de matriz y el minoritario de reforzante. En general, el material reforzante actúa como elemento endurecedor de la matriz, que suele ser menos rígida y más dúctil que aquél.

La gran mayoría de los materiales compuestos son creados artificialmente aunque podemos encontrar algunos presentes en la naturaleza como los músculos, el hueso o la madera. Éste último resulta de la combinación de fibras de celulosa que actúa de material reforzante dando rigidez al conjunto, y resina que funciona como matriz continua rodeando a las fibras, dándoles cohesión y transmitiendo las cargas a las mismas.

La creación de materiales compuestos por parte del hombre no es algo novedoso, ya en el Antiguo Egipto encontramos ejemplos como el adobe, que consistía en la combinación de barro (matriz) y paja(fibras) para dar una pasta moldeable con la que se realizaban los ladrillos.

Otro material que podría considerarse como compuesto es el hormigón armado, que combinaba la resistencia a compresión del hormigón (matriz), con la resistencia a tracción del acero (refuerzo). Desde su popularización en el periodo de entreguerras hasta nuestros días, ha sido utilizado con gran profusión convirtiéndose en el principal material estructural.

Durante las últimas décadas, la tecnología de los materiales compuestos ha gozado de un desarrollo extraordinario, en especial en lo que se refiere a materiales compuestos de naturaleza sintética provenientes de procesos químicos sofisticados, motivado principalmente por la necesidad de fabricar elementos estructurales más ligeros y con buena capacidad resistente. Las nuevas aplicaciones asociadas a los materiales compuestos, en búsqueda del aprovechamiento de todas sus ventajas, generan a su vez nuevas demandas tecnológicas que motivan el desarrollo de nuevos materiales.



Imágenes de la estructura del adobe, el hormigón armado y microestructura de frp

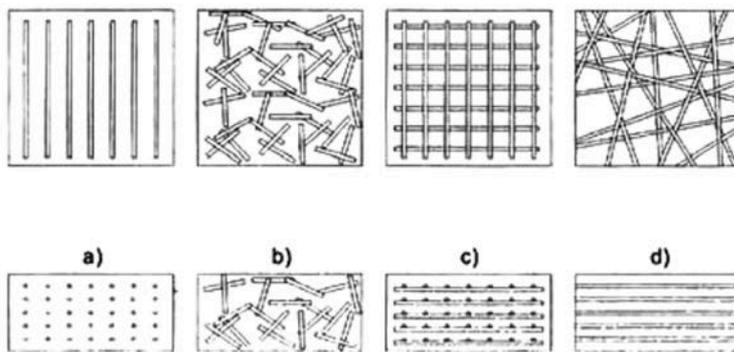
Son varios los campos de aplicación de los materiales compuestos en la sociedad, entre ellos la aeronáutica y el transporte, la electrónica, la medicina o la construcción. También están presentes en el sector del ocio y los deportes gracias a la amplia gama de propiedades disponibles.

Los nuevos composites avanzados están formados por diversas combinaciones de material reforzante-matriz que se pueden clasificar según sea el tipo de matriz: Cerámica (CMC: *Ceramic Matrix Composite*), Metálica (MMC), y Polimérica (PMC).

Tanto los composites de matriz cerámica como los de matriz metálica, además de sus buenas prestaciones mecánicas, tienen la ventaja de poder ser utilizados con altas temperaturas, sin embargo, son aun muy costosos y están en fase de investigación, por lo que su uso en la construcción queda todavía lejano. Los compuestos de matriz polimérica son los que tienen una mayor demanda, siendo su tecnología de fabricación la más desarrollada.

El refuerzo puede ser en forma de partículas o de fibras, siendo estos últimos los más numerosos y ampliamente utilizados. Dentro del compuesto, las fibras de refuerzo pueden quedar orientadas de diversas formas:

- De forma unidireccional (fibras largas) **(a)**
- De manera aleatoria (fibras cortas) **(b)**
- Con disposición ortogonal (mallas) **(c)**
- En varias capas alternadas **(d)**



Como regla general, es más efectivo cuanto menor tamaño tienen las partículas y más homogéneamente distribuidas están en la matriz o cuando se incrementa la relación longitud/diámetro de la fibra.

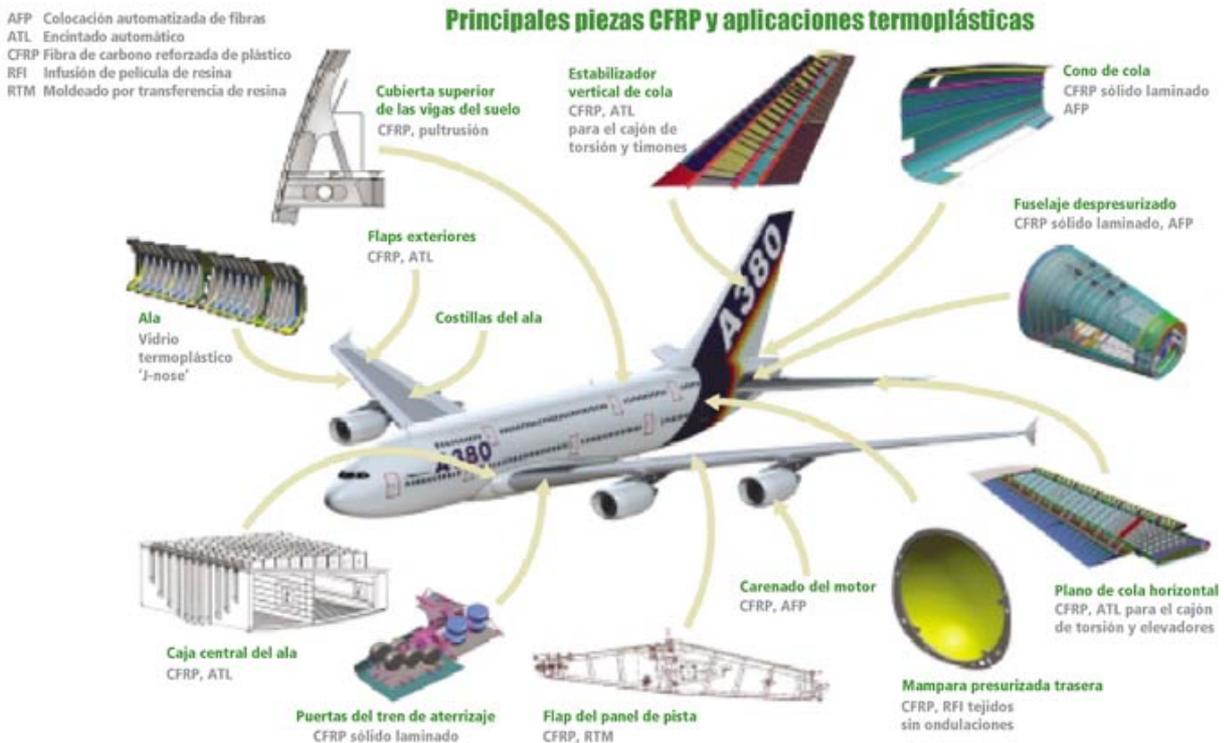
Los polímeros ofrecen numerosas ventajas respecto a los materiales convencionales como la ligereza, la resistencia a la corrosión y a los agentes químicos, y a causa de sus propiedades físicas, pueden ser moldeados con absoluta libertad de formas. Estos polímeros pueden ser combinados con fibras, con el fin de mejorar sus propiedades y convertirse en materiales estructurales capaces de ser utilizados como elementos de una estructura o bien en el refuerzo de estructuras existentes de materiales tradicionales.

De esta forma llegamos al concepto popularmente conocido como FRP (*Fiber Reinforced Plastic*). Estos compuestos de matriz polimérica reforzados con fibras son los de mayor importancia tecnológica, y en función del tipo de fibra empleada pueden distinguirse varios tipos dando lugar a composites con propiedades diferentes: CFRP (con fibras de carbono), GFRP (con fibras de vidrio), o AFRP (con fibras de aramida) son los más comunes.

Estos materiales cubren un espectro de aplicaciones que va desde elementos estructurales y arquitectónicos en construcción hasta las aplicaciones más avanzadas tecnológicamente en la industria aeroespacial, pasando por la industria del automóvil, la construcción de barcos o la energía eólica.

04

MATERIALES COMPUESTOS DE MATRIZ POLIMÉRICA (FRP)



04.1

ORIGEN

La tecnología de compuestos estructurales de polímeros reforzados con fibra se remonta a mediados de 1930, cuando el primer casco de un barco experimental fue fabricado con tejido de fibra de vidrio y resina de poliéster. A partir de entonces, los compuestos de FRP han revolucionado industrias enteras, incluyendo la aeroespacial, naval, automóviles, industria, ocio, vivienda e infraestructura.

Inicialmente, su uso en las estructuras de hormigón y en la ingeniería civil en general se vio limitado por el alto coste y la carencia de experiencia práctica. Durante sus primeros años de vida, se destinaron esencialmente a la fabricación de aviones y armas. Sin embargo, debido a la disminución de la demanda en estos sectores con el final de la Guerra Fría, los fabricantes empezaron a buscar mercados alternativos para estos compuestos, especialmente como materiales de construcción para rehabilitación. La facilidad de montaje, su resistencia y durabilidad hace que los materiales compuestos, dentro del campo de la construcción, encuentren cada vez más usos.

La primera aplicación de un sistema de refuerzo con FRP sucedió en el puente *Kattenbush* en Alemania, entre 1986 y 1987, donde se utilizaron 20 tiras de un laminado polimérico reforzado con fibras de vidrio (GFRP). En Suiza, a partir de principios de los 90, cientos de estructuras fueron reforzadas con laminado de CFRP. Fue en estos dos países donde, gracias a la publicación de los primeros documentos de homologación y recomendaciones de proyecto, aumentó la confianza en los CFRP.

En Grecia, la aplicación de los laminados se extendió a la rehabilitación de edificios de carácter histórico, y en Italia, al refuerzo frente a esfuerzos sísmicos de fábricas y forjados. En Japón los sistemas de refuerzo de FRP se desarrollaron a finales de los años 80, y fueron aplicados por primera vez en 1992, en el refuerzo y confinamiento de elementos en un puente en Tokio. Pero fue en 1995, tras el gran terremoto de Kobe, cuando el uso de FRPs en este país aumento de forma súbita. La reconstrucción de la ciudad después del devastador sismo, es un ejemplo de la importancia de este tipo de materiales en la reparación y refuerzo estructural.

Los Estados Unidos han mantenido un interés constante y continuo en el refuerzo por FRP de las estructuras de HA. El desarrollo en el uso de estos refuerzo tuvo lugar en los años 80, y en 1994 fueron llevados a cabo los primeros ejemplos de rehabilitación de puentes con mantas de CFRP.

Más tarde, en 1996, tuvo lugar la primera aplicación en España con el refuerzo del puente Dragó en Barcelona. A consecuencia del impacto de un vehículo en la viga de borde, la armadura longitudinal del centro del vano resultó seccionada. El puente tuvo que ser reforzado con urgencia y, debido a los mayores plazos de ejecución y medios auxiliares requeridos en opciones alternativas estudiadas, se escogió la aplicación del refuerzo con materiales compuestos como la más adecuada.

Las aportaciones más significativas en cuanto a investigación en relación al comportamiento estructural de los FRP como refuerzo en estructuras de hormigón armado ocurren a final de los 90 en Japón, donde se estableció una clasificación en función del objetivo del refuerzo y su aplicación.

Técnica de reparación	Objetivo del Refuerzo	Áplicasiones
Refuerzo por adherencia	Flexión	Pilares (puentes, edificios), Vigas (puentes), vigas, Forjados, chimeneas
	Cortante	Pilares (puentes, edificios), Vigas (puentes), vigas, Forjados, chimeneas
	Compresión	Pilares (puentes, edificios)
	Prevención del deterioro	Chimeneas, túneles, postes

A finales de 1999, el *American Concrete Institute* generalizó la clasificación anterior y definió tres campos principales de aplicación:

- a. **Rehabilitación:** recuperación de la resistencia de la estructura, donde se encuentre comprometida la seguridad local o global debido a la degradación.
- b. **Refuerzo:** refuerzo estructural de elementos para la corrección de anomalías originadas por deficiencias de proyecto o de la capacidad portante por un aumento en las acciones.
- c. **Sísmico:** situaciones de aumento a la resistencia a acciones sísmicas, por medio de la ductilidad y de la resistencia a cortante de los elementos estructurales, permitiendo de este modo la disipación de la energía y un aumento en la capacidad de deformación.

En los últimos diez años, ha tenido lugar el desarrollo de códigos y normas para el refuerzo mediante FRP en Europa, Japón, Canadá, y los Estados Unidos. En Europa, a finales de 1996, se formó el "*FIB Task Group 9.3: FRP (Fiber Reinforced Polymer) Reinforcement for Concrete Structures*", un grupo de trabajo dentro del FIB⁴ cuyos objetivos principales eran la elaboración de directrices de diseño y la orientación sobre la ejecución práctica de estructuras de hormigón reforzadas. En 2001 se publicó un boletín con una guía de diseño de refuerzos de estructuras de hormigón armado mediante FRP.

El aumento del empleo de los compuestos en sectores como la construcción o el automóvil, donde el precio es un tema clave y hay que competir con materiales de larga tradición, vino propiciado por la mejora y el abaratamiento de los sistemas de fabricación. En el caso de las estructuras de edificación y obra civil, se ha conseguido la sustitución de sistemas de refuerzo tradicionales (recrecidos de estructuras, disposición de pletinas, etc.) por otros basados en la puesta en obra de laminados, sobre todo, de fibra de carbono.

El éxito de estos nuevos sistemas de refuerzo se debe a su sencillez de puesta en obra, unido a unas características mecánicas (resistencia a tracción y módulo elástico) que garantizan una puesta en carga con deformaciones similares a las del acero para armar; a ello se le une una durabilidad superior gracias a su resistencia a la corrosión.

Los laminados de fibra de carbono se emplean de manera similar a las barras de acero corrugado, de manera que el laminado complementa las barras longitudinales de acero en las zonas traccionadas, o bien a los cercos transversales cuando cumple funciones de refuerzo de cortante, siempre teniendo en cuenta que la capacidad de refuerzo del carbono es unidireccional en el sentido de las fibras. Presentan altas características mecánicas, muy superiores a las del hormigón y el acero, por ello, en la mayoría de los casos el éxito del refuerzo viene determinado por el estado y preparación del anclaje más que por el propio laminado de carbono.

Hoy en día, el refuerzo con compuestos se limita a las estructuras de hormigón, madero o fábrica, y no se emplea en estructuras metálicas. El motivo es que, hoy por hoy, la fibra de carbono favorece la corrosión galvánica debido a las diferencias de potencial que se generan cuando está en contacto con metales. Pero no se descarta en el futuro que nuevas fibras sintéticas compatibles se puedan extender a las estructuras de acero.

⁴ El FIB (*Fédération internationale du béton*), formado por 43 naciones y aproximadamente 1.000 miembros individuales o corporativos, es una asociación sin ánimo de lucro comprometida con el avance del desempeño técnico, económico, estético y ambiental de estructuras de hormigón en todo el mundo.

04.2 COMPOSICIÓN

Como se comentó anteriormente, los materiales compuestos están constituidos por dos componentes principales: un material aglutinante denominado matriz (que en el caso de los FRP es polimérica), y un material de refuerzo correspondiente a las fibras, que se encuentran adheridas a la matriz. Además de estos constituyentes, se emplean normalmente otros dos componentes como son cargas y aditivos que dotan a los materiales compuestos de características particulares para cada tipo de fabricación y aplicación.

La combinación de diferentes matrices con distintos tipos de fibras, permite conseguir materiales con propiedades mecánicas muy especiales que se adaptan a los distintos aspectos que requiere un determinado diseño, lo que da como resultado una gran cantidad de combinaciones obteniéndose así muchos tipos de materiales compuestos.

En cuanto a las matrices, existen distintos tipos según su naturaleza, que podemos clasificar en inorgánicas (cemento, yeso, matrices cerámicas, matrices metálicas) y orgánicas (termoestables y termoplásticas). Indudablemente, las matrices inorgánicas son las más empleadas en la construcción, pero en este trabajo se van a tratar principalmente algunas de las matrices orgánicas más utilizadas, ya que son las más comunes en lo que se conoce como materiales compuestos de altas prestaciones.

No todas las matrices pueden ser reforzadas con todas las fibras, por lo que es muy importante analizar las compatibilidades entre las diferentes fibras y matrices.

En consecuencia, se puede establecer una relación de buenas parejas de fibras y matrices que es la que se expresa en la siguiente tabla .

MATRIZ	FIBRA
POLIÉSTER	VIDRIO
VINILESTER	VIDRIO
	ARAMIDA
EPOXI	VIDRIO
	ARAMIDA
	CARBONO
FENÓLICA	VIDRIO

04.2.1 MATRICES ORGÁNICAS

Las matrices orgánicas pueden ser de tipo termoestable o de tipo termoplástica, siendo el primero el tipo más común. La Asociación Española de Materiales Compuestos (AEMAC) define el término termoestable como un “polímero que al curar, bien por aplicación de calor o por medios químicos, se transforma en un material infusible e insoluble”. Entre los polímeros termoestables más comunes encontramos las resinas epoxi, los poliuretanos y las siliconas.

Los termoplásticos son materiales capaces de ser repetidamente reblandecidos mediante incremento de temperatura y endurecido por disminución de la misma. Se diferencian de los termoestables en que estos últimos no funden al elevarlos a altas temperaturas, sino que se queman, siendo imposible volver a moldearlos. Esto tiene un efecto directo en dos aspectos muy importantes: por un lado, la necesidad de protección contra el fuego cuando se emplean en elementos estructurales; y por otro, la posible reciclabilidad de los productos FRP que será más fácil o menos en función de la resina escogida.

La matriz de un material compuesto es la encargada de hacer que éste se comporte como un sólido único. Su función es la protección de las fibras contra la abrasión y corrosión del entorno, así como unir el conjunto de fibras y distribuir la carga. También permitirá determinar

algunas características del material compuesto como la conformabilidad y el acabado superficial, es decir, de las propiedades de la matriz dependerá la capacidad que posea el material compuesto para ser conformado con geometrías complejas en procesos que, generalmente, no involucrarán posteriores etapas de acabado.

Además, muchas veces es la matriz la que determina la resistencia al impacto, las propiedades a cortante y a compresión, y la encargada de detener la propagación de fisuras.

Por lo general, también es la responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a temperaturas elevadas del compuesto.

Dentro del campo de la construcción, las matrices más empleadas son las termoestables y, dentro de éstas, las de poliéster, viniléster, fenólicas y epoxi. A pesar de que cada una tiene unas propiedades muy específicas, también comparten algunas características comunes como su buena procesabilidad y buena resistencia química, así como su facilidad de fabricación.

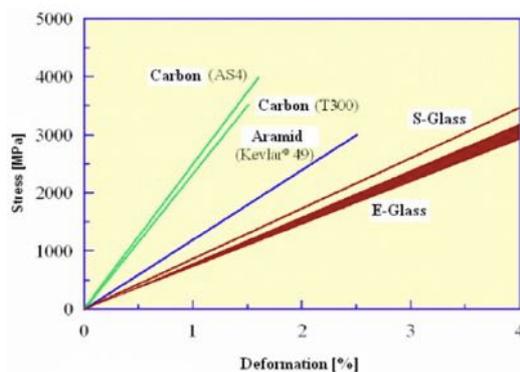
Las resinas epoxis tienen, en general, mejores propiedades mecánicas que el poliéster y viniléster, y una durabilidad excepcional, sin embargo, estas últimas resultan más económicas.

El uso de los adhesivos de naturaleza epoxi viene motivado por una perfecta adherencia sobre multitud de soportes, especialmente sobre hormigón, mampostería o piedra, incluso cuando estos son irregulares. Además tiene un largo *tiempo abierto*, que es el tiempo máximo tras la aplicación para adherir las superficies, lo que facilita los trabajos de puesta en obra.

Los adhesivos de poliéster son de rápido fraguado, aunque presentan eventuales problemas de retracción. Tienen alto coeficiente de expansión térmico, sensibilidad a medios alcalinos y mala adherencia sobre poliéster endurecido.

Los adhesivos de viniléster también presentan problemas de retracción y se ven afectados en gran medida por el contenido de humedad del soporte.

04.2.2 FIBRAS



Las fibras son los componentes resistentes en un FRP y definen la mayor parte de las características mecánicas del material, como la resistencia y la rigidez. Estas propiedades son función tanto del porcentaje como de la orientación de las fibras. Un mayor porcentaje de fibras incrementa la resistencia y rigidez del material compuesto, pudiendo emplearse un límite máximo de un 80% con el propósito de que quede completamente recubierta por la matriz.

Para los plásticos reforzados suelen usarse fibras inorgánicas como las de vidrio y carbono, o fibras sintéticas como las de aramida. Estos tres materiales poseen una resistencia a la tracción extremadamente alta.

Las principales fibras que se emplean con materiales poliméricos son de naturaleza cerámica, siendo las de mayor aplicación las fibras de vidrio y las de carbono. También se usan comúnmente las fibras de naturaleza orgánica, como las de aramida.

Las fibras de vidrio, por su bajo precio y versatilidad, son el esfuerzo más empleado, sin embargo, va aumentando la competencia que sobre ellas ejercen las fibras de carbono y de aramida. Estas fibras, de altas prestaciones, presentan un conjunto de propiedades que compensa sus costes y las convierte, para determinados usos, en una alternativa a la clásica fibra de vidrio.

Fibra de vidrio

La historia de la fibra de vidrio se remonta a la época de los Egipcios, quienes descubrieron sus virtudes de resistencia para armar vasos y ánforas en las tumbas de los faraones.

La fibra de vidrio es el material de refuerzo de mayor aplicación en el área de la construcción, debido principalmente a su gran disponibilidad, sus buenas características mecánicas y su bajo coste. Es por esto que las primeras aplicaciones en ingeniería y construcción han sido realizadas en materiales compuestos de fibra de vidrio.

Se elaboran a partir las mismas materias primas que componen el vidrio, y se le añaden otros componentes en función de las propiedades deseadas. Las principales características que provocan la preferencia de las fibras de vidrio son:

- Alta adherencia fibra-matriz.
- Elevada resistencia mecánica, siendo su resistencia específica (tracción/densidad) superior a la del acero.
- Actúa como un buen aislante eléctrico.
- Presenta una buena estabilidad dimensional, siendo poco sensible a las variaciones de temperatura e higrometría, junto a un bajo coeficiente de dilatación.
- Tiene buena flexibilidad.
- Bajo coste, en relación a otras aplicaciones como es el caso de las fibras de carbono.
- Buena resistencia a agentes químicos, y en función del tipo de fibra de vidrio, a la corrosión, lo que permite su empleo en zonas de ambientes agresivos.

Existen muchos tipos de fibras de vidrio que dependen fundamentalmente del porcentaje de cada uno de los componentes de las que están constituidas. Las tres clases de fibra de vidrio más comunes en la industria de los materiales compuestos son la E-glass (eléctrico), la C-glass (corrosión) y S-glass (estructural).

La fibra de vidrio E es la más utilizada, ya que representa el 90% del refuerzo empleado en los materiales compuestos; tiene muy buenas propiedades eléctricas, una alta durabilidad, baja absorción de agua y presenta un bajo coste. La fibra de vidrio C, presentan elevada resistencia química, siendo empleada principalmente en capas superficiales de elementos que son expuestos a corrosión. La fibra de vidrio S tiene buena resistencia mecánica, y en especial, una elevada resistencia a la tracción, lo que permite su empleo en aplicaciones estructurales.

La fibra de vidrio S-glass tiene una relación resistencia/peso más alta y de mayor costo que la fibra de vidrio E-glass y que la C-glass. Por estas características, las fibras S-glass han sido empleadas en aplicaciones en la industria aeroespacial y militar.

Además de éstas, existen otros tipos de fibra de vidrio menos habituales en el sector industrial pero de gran interés para el sector de la construcción como la fibra de vidrio A-glass, con alto contenido de álcalis presentando gran resistencia química; y la fibra de vidrio AR-glass, correspondiente a álcali resistente y siendo la única fibra de vidrio posible de combinarse con el hormigón, por lo que es muy empleada en el sector de la construcción.

Fibra de aramida

Las fibras orgánicas más comunes en el mercado son las fibras de aramida, el cual es el nombre genérico de las fibras de poliamida aromática. Fueron introducidas comercialmente en 1972 bajo el nombre comercial de Kevlar.

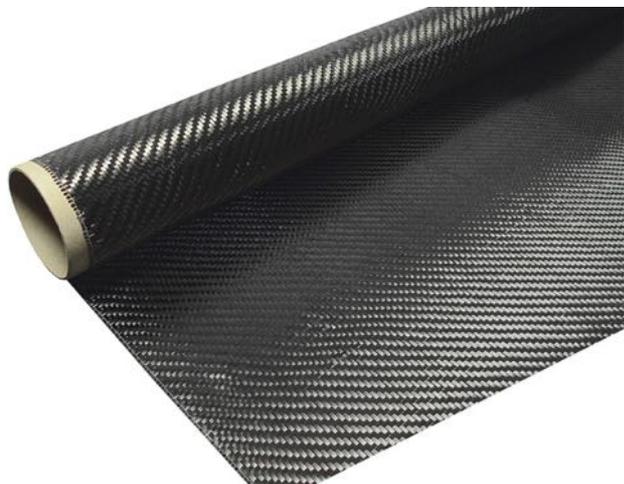
Las características singulares de esta fibra orgánica son su buena resistencia al impacto y su alta capacidad de absorción de energía, que la hacen singularmente interesante para blindajes, como los chalecos de protección balística y para la fabricación de piezas o elementos constructivos que deben soportar impactos.



Fibra de vidrio



Fibra de aramida



Fibra de carbono

Fibra de carbono

Las fibras de carbono fueron utilizadas por Edison en el siglo XIX como filamentos para bombillas. La investigación que dio como resultado el uso de estas fibras en los materiales compuestos modernos se atribuye a diferentes trabajos de principios de los años sesenta en Japón, Inglaterra y Estados Unidos.

Aunque su aplicación en el sector de la construcción es reciente, el uso de esta fibra no es una novedad en el mundo, hace más de 30 años se viene aplicando en la industria aeroespacial.

Las fibras de carbono se fabrican mediante tratamiento químico de fibras orgánicas como el poliacrilonitrilo (PAN) o el alquitrán; el primero es una fibra sintética y el segundo se obtiene de la destilación destructiva del carbón.

Es un material excepcional para aplicaciones de estructuras sometidas a cargas repetitivas o fatiga ya que es el único material conocido cuyas propiedades mecánicas apenas son sensibles a la aplicación de una carga cíclica. Esta alta resistencia a la fatiga hace que goce de ciclos de vida más largos en comparación con otros materiales.

Su densidad es baja, lo cual implica que sus propiedades mecánicas específicas o por unidad de peso sean excepcionalmente elevadas. Su coste, más elevado que el de las fibras de vidrio, está bajando drásticamente, debido al aumento de la demanda, al ser aplicado en numerosos sectores productivos.

A partir de las temperaturas del tratamiento de calentamiento, se han identificado tres tipos diferentes de fibras de carbono:

- La fibra de alto módulo (HM) es la más rígida y requiere la mayor temperatura en el tratamiento.
- La fibra de alta resistencia (HR) es la más fuerte y se carboniza a la temperatura que proporciona la mayor resistencia a tracción.
- El último tipo de fibra (III) es la más barata; la rigidez es menor que en las anteriores pero la asistencia es buena. Este tipo tiene la temperatura más baja en el tratamiento.

Las fibras de carbono se distinguen por sus características específicas elevadas:

- Tienen un coeficiente de dilatación muy bajo, lo que permite una gran estabilidad dimensional a las estructuras y una conductividad térmica elevadas.
- Alta rigidez específica y gran resistencia (hasta 9 veces la resistencia del acero).
- Tiene una resistencia a la fatiga asombrosa, la más elevada hasta ahora conocida.

Pero también presenta algunos inconvenientes como ,por ejemplo, que no presenta plasticidad, el límite de rotura coincide con el límite elástico. En materiales estructurales, esto resulta un problema, ya que la pieza rompería sin previo aviso. Además, su resistencia al roce es muy baja, lo que condiciona su manipulación. Por último, tienen los inconvenientes del coste, la baja resistencia al impacto de baja energía y las diferencias de potencial que generan al contacto con los metales, que pueden favorecer corrosiones de tipo galvánico.

		Módulo medio-alto	Módulo alto	Módulo muy alto	Acero
Densidad	Kg/m ³	1800	1820	2100	7850
Módulo elástico	GPa	230	390	700	210
Resistencia tracción	MPa	4830	4410	1500	540
Deformación última	%	2.0	1,1	0.3	20
Resistencia específica	$\frac{\text{MPa} \times \text{m}^3}{\text{kg}}$	2.78	2.42	0.71	0.07

Comparativa de las diferentes fibras de carbono y el acero



Edificios-prototipo de los años 60: *Future house* (izquierda) y *Monsanto house of future* (derecha)



Edificio *Eyecatcher*

04.3

LOS FRP EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

La introducción de los composites en una industria de la construcción no es nada fácil. Los compuestos fibra de vidrio-resina son los más empleados, desde su aparición han revelado tal flexibilidad de uso que se han intentado numerosas experiencias en la construcción. Sin embargo, a pesar de los numerosos aspectos positivos presentados por estos materiales, no ha habido una generalización de estas realizaciones. Al entusiasmo del descubrimiento de unos nuevos materiales de unas características muy singulares se oponía el problema de durabilidad de los mismos y de su resistencia al fuego. Actualmente estos problemas están casi resueltos, lo que da lugar a un nuevo desarrollo de los composites en la industria de la construcción.

En cuanto al refuerzo estructural, se ha fomentado el desarrollo de compuestos de fibra de carbono frente a la fibra de vidrio debido a que los primeros tienen un módulo elástico más alto, y por lo tanto, son más adecuados para soportar cargas mayores.

Alguno de los sistemas y elementos en los que se están usando los materiales compuestos en el sector de la construcción en la actualidad se pueden clasificar en:

Cubiertas y tejados

Desde sus inicios, los composites de fibra de vidrio se emplean en la realización de placas translúcidas para iluminación industrial. Con el tiempo, las aplicaciones no han parado de crecer y continúan todavía desarrollándose para la iluminación cenital y la cobertura de grandes espacios con cúpulas "acristaladas".

Fachada

Los paneles de fachada, son ampliamente utilizados en la construcción, tanto en edificios nuevos como en rehabilitación. Representan la mayoría de la utilización de los composites de resina-fibra de vidrio en este sector (40% en USA y el 50% en Europa).

En rehabilitación, las posibilidades de moldeo, y la capacidad de coloración y texturizado, permiten reproducir muy fácilmente la conformación arquitectónica del edificio que hay que rehabilitar.

Edificios en composites

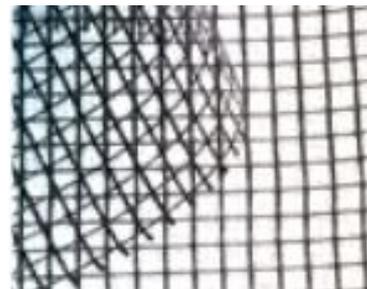
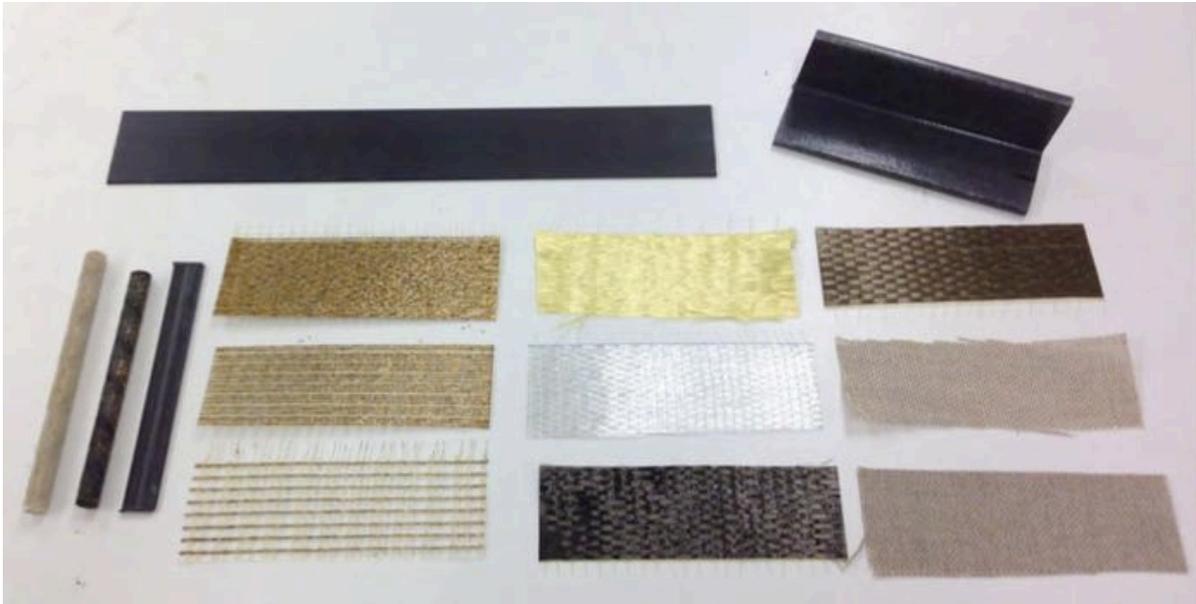
Entre los años 50 y 60 aparecieron realizaciones de prototipos de viviendas realizadas en plástico reforzado. Se tenían puesta muchas esperanzas en estos materiales ya que los diseñadores podían dejar libre la imaginación para conseguir cualquier tipo de formas, debido a la gran flexibilidad de los mismos. Sin embargo, era el comienzo de los composites y las características de estos materiales estaban muy lejos de cubrir todas las exigencias y garantías exigidas para una vivienda.

Hoy en día, existen edificios-prototipo, como el *Eyecatcher*⁵, realizado para la exposición Swissbau 99 en Basilea, construido totalmente con perfiles pultruidos de GFRP. También hay

⁵ Es el edificio más alto construido totalmente con perfiles pultruidos de GFRP, después de su exposición en Swissbau 99, la construcción fue desmontada y reconstruida en su ubicación final en Münchensteinerstrasse 210, Basilea, donde ahora está sirviendo como un edificio de oficinas. El edificio presenta una altura de 15 metros, 5 pisos y un área de construcción de 10 x 12 metros.

La estructura portante fueron tres marcos de GFRP similares triangulares, de las cuales dos forman los lados de la construcción, constituyen la base estructural. Para su construcción se realizaron pruebas a escala de uniones adhesivas.

Muestras de diferentes productos de materiales compuestos.



ejemplos de su uso en partes de edificios como la cúpula de la torre AGBAR en Barcelona, una estructura elíptica en dos piezas de resina termoestable reforzada con fibra de vidrio direccional y en tipo sándwich, que cubre el sistema de antenas situadas en la cúspide. Se empleó materiales compuestos debido a que no producen interferencias con campos electromagnéticos,

Estructuras

A pesar de estos primeros prototipos, no han sido muchas las aplicaciones de los materiales compuestos en elementos estructurales de edificios, aunque su uso en la ingeniería civil, sobre todo en puentes y pasarelas es actualmente muy frecuente. Este tipo de estructuras son realizadas en composite por pultrusión, técnica que permite unos elementos de forma y sección constante.

En cuanto a la rehabilitación estructural, que es el tema de este trabajo actualmente, las resinas epoxi reforzadas con fibra de carbono constituyen uno de los métodos más eficaces usado en la reparación de estructuras de hormigón, debido, sobre todo, a su resistencia a la corrosión y a su ligereza, que se traduce en facilidad y ahorro en el transporte y puesta en obra.

La introducción en el campo de la rehabilitación estructural de composites reforzados con fibra de carbono vino de la mano de la creación de nuevos productos o sistemas específicos que adecuaran sus prestaciones a los nuevos requerimientos.

04.3.1 PRODUCTOS Y SISTEMAS DE REFUERZO

Los refuerzos con sistemas CFRP se realizan de forma muy rápida, con pocos operarios y sin necesidad de utilizar maquinaria pesada con todo lo que ello supone de cara a la permanencia en servicio de la estructura.

Consisten en la adhesión externa del material de refuerzo sobre la superficie del hormigón. Como se ha explicado en apartados anteriores, el material compuesto tiene unas prestaciones mecánicas muy altas, principalmente resistencia a la tracción, de esta forma, los materiales compuestos actúan como una armadura externa con unas funciones muy similares a las que hace la armadura interna de acero.

Existen dos tecnologías básicas de aplicación de los productos del refuerzo: mediante laminados preconformados (de fabricación industrial y aplicación directamente en obra) y mediante textiles (donde la fabricación del compuesto se realiza *in situ*, durante la aplicación en obra). Estos dos sistemas integran el compuesto en la estructura de hormigón a modo de piel resistente.

Otra posibilidad menos común en rehabilitación es el refuerzo mediante elementos estructurales externos tipo viga de perfil de material compuesto (de fabricación industrial).

Laminados preconformados

En esta tecnología el material compuesto se presenta habitualmente en forma de laminados con fibras dispuestas unidireccionalmente embebidas en una matriz de resina. Normalmente tienen un espesor de entre 1 y 2 mm, y una anchura entre 50 y 150 mm. Se presentan en rollos de diferentes longitudes según la marca suministradora, normalmente, entre 100 y 500 m lineales que después se pueden cortar en obra a medida. El material preconformado es el que tiene mayores garantías de calidad porque se ha fabricado en industria bajo condiciones controladas. Por ello, los laminados preconformados suelen tener unas propiedades homogéneas.

Para adherir los laminados al soporte se utiliza una resina epoxi. Es un adhesivo de dos componentes de consistencia pastosa y alta tixotropía⁶, que garantiza la puesta en obra en paredes verticales o techos sin problemas de despegue ni derramamiento durante la aplicación. Las características que debe tener el adhesivo que se utilice para este fin son:

- Buena resistencia, principalmente a tracción y cizalla.
- Temperatura de transición vítrea elevada.
- Buena adherencia al hormigón y a los laminados.

Tejidos de fibras

Los tejidos de fibra de carbono, aramida o vidrio son textiles trenzados sin matriz de resina. Resuelven la mayoría de las necesidades de refuerzo y rehabilitación de estructuras (impactos, sismo, compresión y cortante). Forman uno de los componentes del material compuesto. Tienen normalmente entre el 95% y el 98% de las fibras en dirección longitudinal (trama principal) y entre el 2% y el 5% en la dirección transversal (trama secundaria), para efectuar el cosido.

Su espesor está, normalmente, entre 0,1 y 0,5 mm, con gramaje de entre 200 y 800 g/m³. Se presentan con anchos de entre 200 y 600 mm, en rollos de entre 40 y 100 m, que posteriormente se cortan en obra en las dimensiones deseadas.

El tejido se extiende sobre la superficie de hormigón y se adhiere con resinas epoxi fluidas. Esta fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas y formar el material compuesto. Esta forma de efectuar el refuerzo requiere de manipulación en obra y por lo tanto, una mayor complejidad en la aplicación.

Los tejidos pueden colocarse con el “sistema en húmedo” o mediante el “sistema en seco”. En el proceso de aplicación en seco, el tejido se coloca directamente sobre el adhesivo aplicado previamente sobre la superficie de hormigón a reforzar.

Se aplica con el sistema húmedo las fibras tejidas con un peso mayor de 300 g/m² y todas las fibras no tejidas. El tejido se impregna con la resina bien con un saturador mecánico, o bien manualmente sobre una mesa de trabajo, y se aplica “húmedo” sobre el soporte. Este es un sistema ideal para grandes aplicaciones y tejidos pesados y tupidos.

Para conectar estos tejidos a las piezas de hormigón o mampostería, se emplean cordones o mechas de fibras de carbono unidireccionales revestido por un tubo de plástico.

Perfiles

Existe un tercer tipo de sistema que se compone de un producto laminado, igual al descrito en el primer sistema, pero que ya viene doblado en forma de "L". En este caso es un perfil pensado para adaptarse a ángulos rectos. Esta forma es especialmente óptima para hacer refuerzos a esfuerzo cortante.

Estos laminados se presentan en piezas largas que pueden adaptarse a las dimensiones de las vigas (entre 30 cm y 100 cm para cada uno de los brazos). La resina que se utiliza para este sistema es la misma que la descrita en el sistema de laminados rectos.

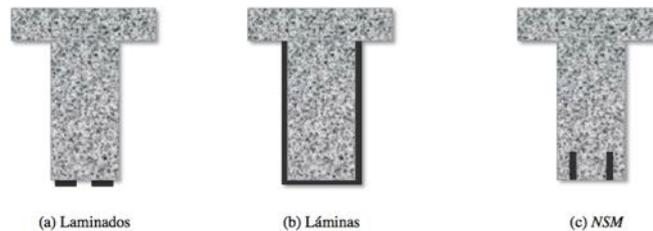
También existen otras variedades de preconformados en forma de barra con diferentes tipos de sección: redonda, cuadrada, rectangular, etc. Estos perfiles pueden ser adheridos a la viga de hormigón dentro de canaladuras longitudinales (sistema conocido como NSM: *Near Surface Mounted*) o ser usados como anclajes mediante perforaciones transversales.

⁶ Tixotropía es la propiedad de algunos fluidos que muestran un cambio de su viscosidad en el tiempo; cuanto más se someta el fluido a esfuerzos de cizalla, más disminuye su viscosidad.

Comparativa de los sistemas de aplicación del refuerzo

Básicamente existen tres sistemas de aplicación del refuerzo: el refuerzo *FRP* de perfiles y laminados que se adhieren en superficie (a), el refuerzo con hojas (b) y finalmente, el refuerzo con perfiles que se introducen en canaladuras que se practican a lo largo de la pieza (c).

En la tabla podemos ver una comparativa de las características generales de los tres sistemas.



	Laminados	Láminas	NSM
Forma	Tiras rectangulares y perfilería	Tejido unidireccional o bidireccional	Laminados o perfiles embebidos
Espesor	1,0 - 2,0 mm	0,1 - 0,5 mm	1,0 - 10,0 mm
Anchura	50 - 150 mm	200 - 600 mm	10 - 30 mm
Uso	Unión simple con adhesivo de perfiles y laminados prefabricados	Unión e impregnación de la fibra seca con resina y curado <i>in situ</i>	Unión simple de perfiles y laminados prefabricados con adhesivo en un ranurado
Observaciones y Aplicaciones	Para forjados. Unión con adhesivo tixotrópico. No son recomendadas más de una capa. La rigidez del laminado y el uso de adhesivos tixotrópicos permite ciertas irregularidades de la superficie. Sencillo en el uso. Calidad garantizada desde la fábrica. Adecuado para reforzar en curvas o ángulos. Necesita estar protegido contra el fuego.	Fácil de aplicar en superficies curvas. Resina con baja viscosidad para unir e impregnar. Se pueden usar múltiples capas (más de 10 son posibles). Las irregularidades deben ser niveladas. Puede ser combinado con sistemas de acabados como el yeso o la pintura. Adecuado para cortantes o refuerzos en curvatura. Necesita estar protegido contra el fuego.	Depende de la distancia al armado. Las ranuras deben ser serradas en la superficie del hormigón. Las ranuras deben estar limpiadas cuidadosamente antes de la unión. Unión con adhesivo tixotrópico. Es posible utilizar mortero de cemento para la unión. Adecuado para refuerzo en curvatura. Protección mínima contra el fuego.

04.3.2 CAMPOS DE APLICACIÓN

La necesidad de reforzar una estructura puede ser debido a varios motivos:

Incrementos de cargas:

- Incremento de la capacidad resistente en pilares, forjados y vigas.
- Aumento de la capacidad de puentes para soportar un aumento de cargas axiales.
- Instalación de maquinaria pesada.

Defectos del proyecto o de la ejecución

- Dimensiones insuficientes de los elementos estructurales.
- Armadura insuficiente o mal colocada.
- Mala disposición de los elementos estructurales.
- Materiales de baja calidad.

Renovación de estructuras antiguas

- Conocimientos de insuficiencias del método de cálculo empleado.
- Consideración de refuerzos frente a solicitaciones dinámicas.
- Envejecimiento de los materiales con pérdida de sus características iniciales.
- Adecuación del proyecto inicial a nuevas normas más exigentes.

Cambios en la propia forma de la estructura

- Apertura de huecos en forjados.
- Eliminación de pilares o muros de carga.

Daños en la estructura

- Impactos sobre la estructura.
- Incendios.
- Corrosión y pérdida de sección de las armaduras del hormigón.
- Sismo.

Necesidad de mejora en las condiciones en servicio

- Reducción en la tensión de las armaduras.
- Disminución en las deformaciones y flechas, utilizando laminados de alto módulo.
- Disminución de la abertura de las fisuras
- Reducción de la fatiga.

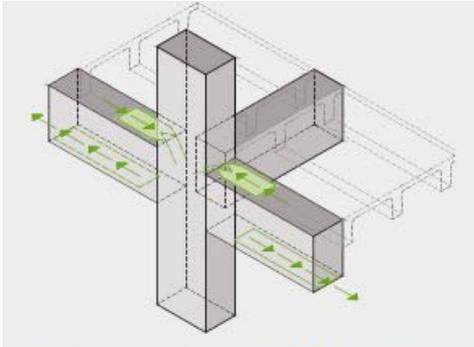
Ya se ha comentado en puntos anteriores de este trabajo las excelentes propiedades de los polímeros reforzados con fibra de carbono y los formatos disponibles comercialmente. Este hecho permite la aplicación de los productos en función de las necesidades de refuerzo de la estructura (solicitaciones estáticas y dinámicas).

Otra ventaja de los refuerzos mediante CFRP además de su ligereza y de sus propiedades mecánicas ya justificadas, es que se trata de un sistema de refuerzo que envuelve el elemento estructural, sin incrementar prácticamente su volumen ni reducir los espacios para permitir la actividad a desarrollar. Además, una vez colocado, se le puede aplicar al refuerzo una capa de pintura que puede ocultarlo aún más en el global de la estructura y puede pasar desapercibido completamente. Existen a su vez resinas y protectores de acabado aplicables sobre el refuerzo para mejorar sus propiedades y durabilidad, según el caso, protectores contra incendios, contra la luz solar, etc.

Estos refuerzos pueden ser activos o pasivos; en los primeros, los elementos de refuerzos entran en carga a la vez que la estructura (pretensados y postesados), son adecuados para situaciones en los que los elementos originales sean poco seguros. Se empleará en los casos que el material de la estructura original (en este caso hormigón) no sea capaz de desplazar las cargas a la estructura resistente del refuerzo.

Los refuerzos pasivos son aquellos que entran en carga cuando se dan ciertas condiciones propias del material (por ejemplo, su retracción o fluencia), o cuando el material falla. A diferencia de los refuerzos activos, el material de la estructura original, por su deformabilidad o plasticidad, sí que garantiza la entrada en carga del refuerzo cuando sea necesario.

Refuerzo a flexión



El refuerzo a flexión de vigas, viguetas, forjados y otros elementos de hormigón armado se realiza principalmente mediante el pegado de laminados rectos o de tejidos de fibra de carbono sobre la cara traccionada. En ambos casos, se basa en adherir el refuerzo que actuará como armadura externa de tracción mediante un adhesivo cuya función será la de transmitir el esfuerzo cortante entre el refuerzo y el hormigón. La capacidad a flexión de elementos reforzados, pretensados y postensados puede aumentar hasta un 70%.

Este tipo de refuerzo se puede aplicar sobre muros de hormigón, e incluso de mampostería, para aumentar las resistencias a cargas fuera del plano, cargas de viento, presión del suelo, presión de fluidos en tanques y voladuras. En zonas de momentos negativos se puede aplicar el refuerzo en la parte contraria para aumentar también su capacidad portante.

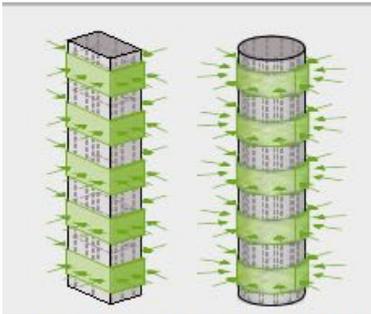
En el caso de muros, el *FRP* se puede aplicar tanto a esfuerzos longitudinales (cargas sísmicas, de viento, etc.) como verticales (cargas gravitatorias). Con el sistema de pegado de tejidos colocados en forma de cruz de San Andrés se consigue mejorar la capacidad portante de los muros contra cualquiera de las cargas indicadas anteriormente.

Proceso:



- 1) Preparación del soporte consiguiendo una superficie lisa y seca.
- 2) Imprimación
- 3) Resina epoxi en estructura y en el laminado
- 4) Colocación de la lámina en la estructura y paso de rodillo para asegurar su pegado y eliminar la resina sobrante

Refuerzo por confinamiento



Para elementos sometidos a compresión simple o compuesta se puede hacer un refuerzo por confinamiento. Este tipo de refuerzo se hace principalmente en pilares, ya que cuando la pieza se comprime, se acorta y se dilata transversalmente. El efecto de confinamiento es controlar esta dilatación transversal, mejorando así la capacidad portante.

El sistema a utilizar es el de tejidos unidireccionales, debido a su fácil adaptabilidad a cualquier forma del soporte. Se basa en envolver la pieza a reforzar completamente, de abajo a arriba, disponiendo de tantas capas de tejido como se desee. Esta envoltura provoca un confinamiento de la pieza que hace mejorar su comportamiento frente a cargas.

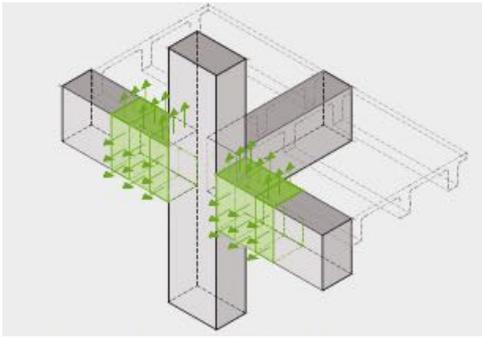
Es más efectivo en secciones circulares ya que la presión de confinamiento se aplica de manera uniforme sobre todo el perímetro. En el caso de tener que aplicarlo en pilares de sección cuadrada, habrá que redondear las esquinas previamente, para evitar que dañen la tela y conseguir que esta tenga mayor agarre.

Proceso:



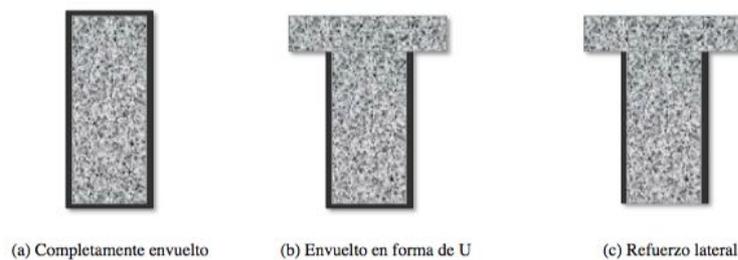
- 1) Preparación del soporte consiguiendo una superficie lisa y seca.
- 2) Medición y corte en obra del tejido de fibra de carbono
- 3) Imprimación
- 4) Resina epoxi sobre la estructura
- 5) Colocación del tejido sobre la estructura (tantas capas como sean necesarias)
- 6) Gel de protección e impregnación de las fibras
- 7) Espolvoreado de arena para poder aplicar un recubrimiento posteriormente

Refuerzo a cortante



Para los esfuerzos a cortante pueden emplearse tanto perfiles en forma de "L" como tejidos para aumentar la capacidad a cortante de vigas, pilares y otros elementos de hormigón. Mediante un adecuado refuerzo a cortante, se puede incluso llegar a duplicar la capacidad de los elementos conectados, así como también aumentar su comportamiento dúctil. En esta aplicación el laminado se orienta transversalmente, de forma similar a las barras inclinadas o los estribos de acero que se utilizan en el hormigón armado tradicional.

Los laminados pueden abrazar completamente las vigas (a) para proporcionar una capacidad adicional a cortante con el fin de aumentar la resistencia a cargas sísmicas, cargas de viento o movimientos de elementos contiguos, por ejemplo debidos a la fluencia y contracción de estos elementos. La envoltura en "U" (b) consiste en abrazar los lados y la parte inferior de la sección con el objetivo de aumentar la resistencia a cortante de la viga en las zonas sometidas a altos esfuerzos a cortante.



(a) Completamente envuelto

(b) Envuelto en forma de U

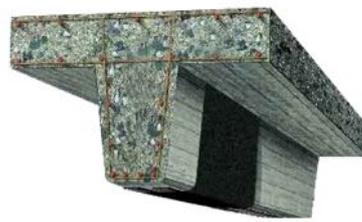
(c) Refuerzo lateral

El proceso a seguir será el mismo que en el caso del confinamiento, cambiando únicamente el lugar donde se aplica el refuerzo.

- 1) Preparación del soporte consiguiendo una superficie lisa y seca.
- 2) Medición y corte en obra del tejido de fibra de carbono
- 3) Imprimación
- 4) Resina epoxi sobre la estructura
- 5) Colocación del tejido sobre la estructura (tantas capas como sean necesarias)
- 6) Gel de protección e impregnación de las fibras
- 7) Espolvoreado de arena para poder aplicar un recubrimiento posteriormente

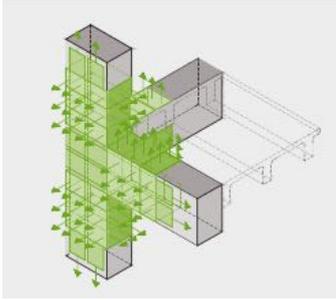


Refuerzo con perfiles en L

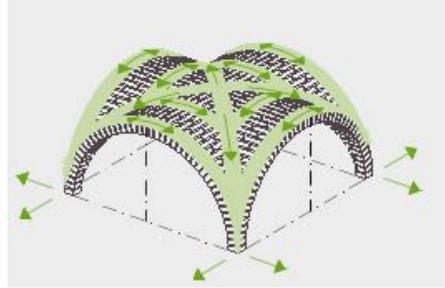


Refuerzo con tejidos

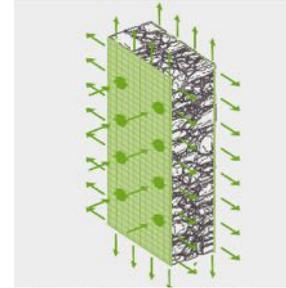
Refuerzo frente a sismo



Refuerzo de nudos



Refuerzo de bóvedas



Refuerzo de muros

En un terremoto se libera una alta cantidad de energía, emitida en forma vibratoria, ésta deberá ser absorbida en un tiempo muy corto por los diversos materiales que la onda encuentra a su paso.

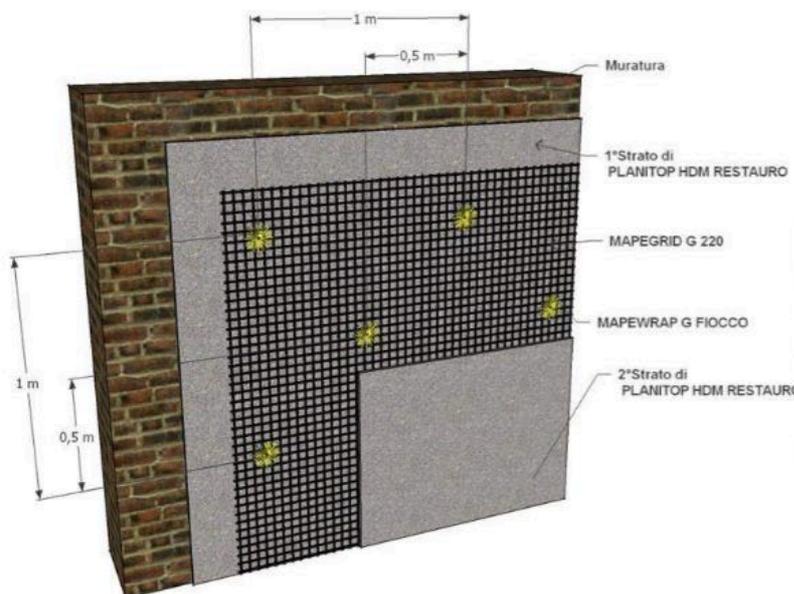
Los paramentos de cierre laterales, techos y forjados, de por sí constituidos por elementos rígidos, se apoyan en vigas y pilares, también rígidos. Cuando unos y otros reciben las ondas vibratorias, no las absorben suficientemente, sobreviniendo la disgregación de muros, techos y forjados de los soportes que los mantienen, sobreviniendo el derrumbe.

El Módulo de Young de los composites en fibra de vidrio es entre 3 y 10 veces (en función, nuevamente, del tipo y cuantía del refuerzo) inferior al hormigón armado, es decir, es mucho menos rígido.

La protección antisísmica de las estructuras se realizará con el refuerzo a cortante de muros, y bóvedas, y el refuerzo local de nudos viga-pilar mediante tejidos de fibra de carbono.

En el caso de los muros, se emplearán mechas de hilos de fibra de carbono que se introducirán en el muro para conectar el refuerzo a la estructura. Este refuerzo será a base de rejilla de fibra de vidrio con matriz cementicia.

Al tratarse de tejidos, el proceso para realizar el refuerzo será el mismo que en los casos de confinamiento y cortante.



04.3.3 MODOS DE COLAPSO

Mediante el refuerzo exterior con FRP se obtiene un incremento significativo de la capacidad de vigas de hormigón, tanto para flexión como para cortante. Dado que los laminados están adheridos en superficie, se pueden producir fallos mecánicos que no existen en las vigas tradicionales de hormigón armado, como por ejemplo, los fallos por despegue o el arrancamiento superficial del hormigón.

En el caso de flexión, donde los laminados se aplican sólo en la superficie inferior de tracción, los fallos por despegue pueden limitar la completa utilización de la capacidad a flexión de las vigas de hormigón reforzadas. Podemos clasificar los modos de colapso en dos grandes grupos:

Fallo por interacción completa del compuesto

- 1) El laminado de *FRP* adherido y traccionado sufre una rotura. Esto suele ir precedido por el colapso del acero del armado.
- 2) El hormigón se fisura en la cabeza de compresiones y sufre aplastamiento.
- 3) El hormigón se fisura a cortante y colapsa.

Fallo por rotura o despegue del laminado:

- 4) Despegues de esquinas de la lámina sin la formación de fisuras de cortante asociadas.
- 5) Hormigón con formación de fisuras horizontales, propagadas desde la esquina, en una capa intermedia entre el laminado externo y el acero traccionado.
- 6) Laminado de flexión despegado en la región donde la curva de momentos es máxima.
- 7) Despegue de esquina por la formación de una fisura de cortante.

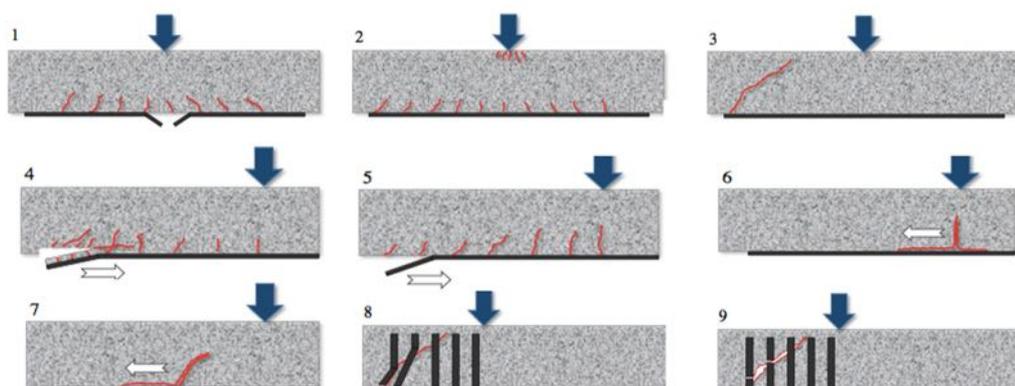
En el caso de cortante los modos de fallo son los siguientes:

Despegue del laminado:

- 8) La pieza de hormigón falla a cortante y se genera una fisura inclinada que provoca el despegue del laminado.

Rotura parcial del laminado:

- 9) La pieza de hormigón falla a cortante y se genera la fisura inclinada. La deformación en el laminado, según la dirección de la diagonal de tensión, crece hasta provocar la rotura de las fibras.



04.4

COMPARACIÓN CON SISTEMAS DE REFUERZO TRADICIONALES

Para comprender mejor algunas de las ventajas ya explicadas a lo largo del trabajo, estudiaremos el ejemplo del refuerzo de una viga a flexión mediante tres sistemas diferentes: un recrecido de hormigón, una chapa de acero y un laminado.

Debido a la insuficiencia de recubrimiento de la armadura respecto al paramento, y al ambiente agresivo del medio, la viga presenta una pérdida importante de armadura a tracción.

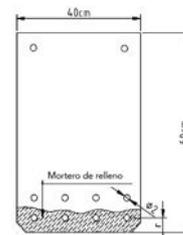
A causa de la carbonatación del hormigón de recubrimiento ($pH < 9$), las armaduras han quedado despasivadas, y han desarrollado una oxidación importante, con expansión y rotura por efecto cuña del recubrimiento circundante.

En los tres casos, el primer paso que habría que dar sería el saneamiento de la pieza eliminando el hormigón carbonatado y realizando las operaciones de pasivado de las armaduras existentes.

Vamos a calcular cuál de las tres soluciones es la que aporta menos peso a la estructura.

Sistema 1: Recreido mediante encofrado con incorporación de barra corrugada ($\varnothing 20$ mm).

$$W_{\text{recreido}} = W_{\text{mortero}} + W_{\text{acero}} = 73,6 + 9,86 = \mathbf{83,46 \text{ Kg}}$$



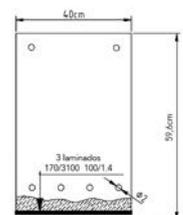
Sistema 2: Adhesión de chapa de acero con resina epoxi

$$W_{\text{CHAPA}} = \rho_{\text{ACERO}} \times V_{\text{m lineal}} = 7,85 \text{ g/cm}^3 \times 100 \text{ cm largo} \times 0,3 \text{ cm espesor} \times 40 \text{ cm ancho} = \mathbf{9,4 \text{ Kg}}$$



Sistema 3: Adhesión MBrace LAMINATE (3 Laminados 170/3100 100x1,4)

$$W_{\text{laminado}} = \rho_{\text{laminado}} \times V_{\text{m lineal}} = 1,6 \text{ g/cm}^3 \times 3 \times 100 \text{ cm largo} \times 0,14 \text{ cm espesor} \times 10 \text{ cm ancho} = \mathbf{0,7 \text{ Kg}}$$



Como se puede ver, el refuerzo con composite es la solución más ligera y además consigue reducir el volumen de la viga.

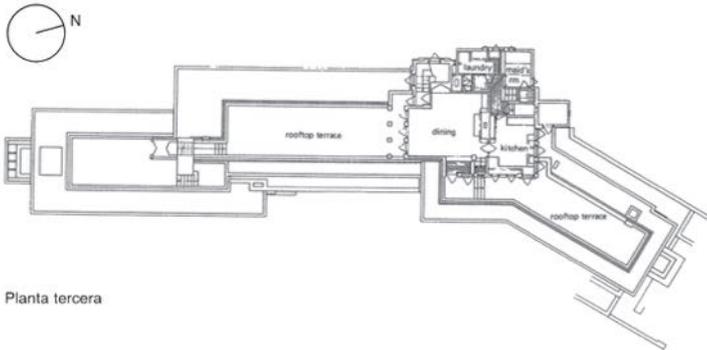
05

CASOS PRÁCTICOS

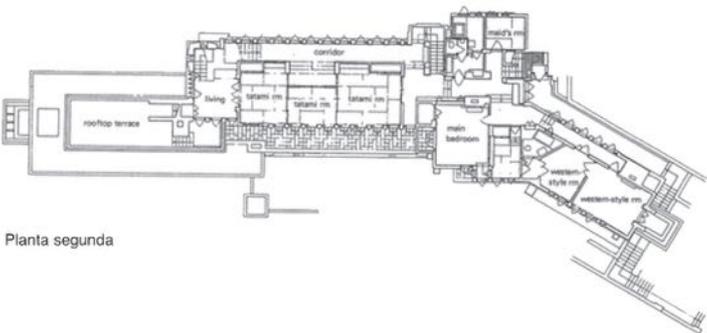
05.1

CASA YAMAMURA Prefectura de Hyogo (Japón)

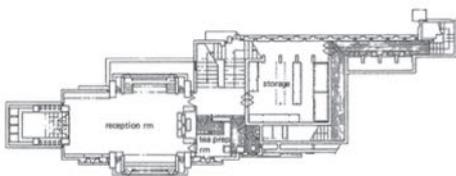




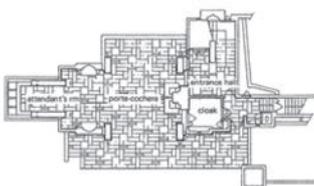
Planta tercera



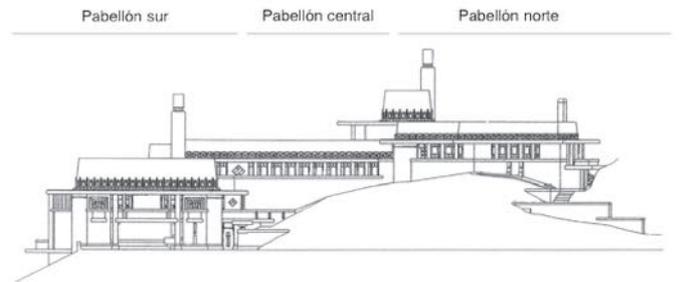
Planta segunda



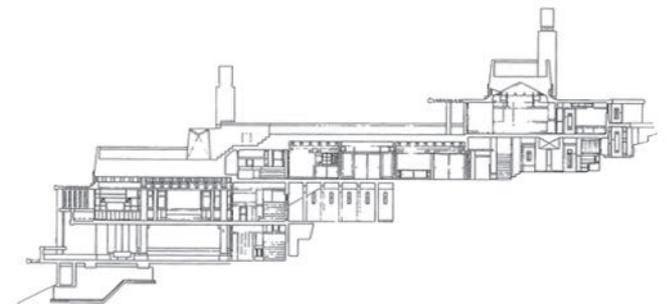
Planta primera



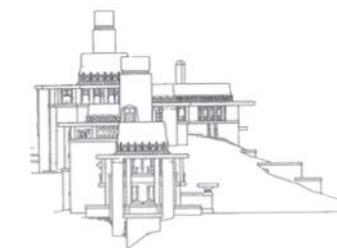
Planta baja



Alzado este



Sección longitudinal



Alzado sur

Obra: RESTAURACIÓN DE LA CASA YAMAMURA

Ubicación: Ashiya , prefectura de Hyōgo (Japón)

Año construcción: 1918-24

Autor/es: Frank Lloyd Wright y Arata Endo

Año intervención: 1995

Autor/es: Hidekazu Nishizawa

Productos FRP empleados:

Tejidos de fibra de carbono

Resinas epoxi

Uso característico del FRP:

Refuerzo frente a sismo con una intervención mínima en una obra protegida.

El edificio:

Durante su estancia en Japón motivada por la construcción del Hotel Imperial de Tokyo, Frank Lloyd Wright recibió varios encargos locales menos conocidos. En total, Wright diseñó doce proyectos en suelo japonés, de los cuales se construyeron siete. En la actualidad, de estos siete edificios, sólo dos se conservan de manera íntegra: la Escuela Jiyu Gakuen y la Casa Yamamura.

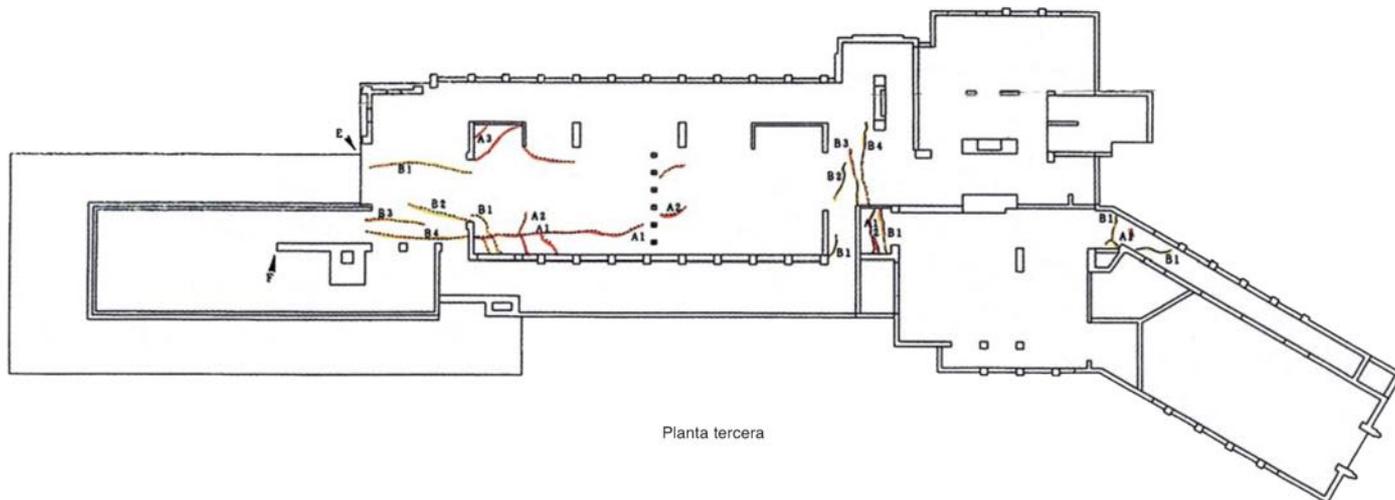
La casa, que fue proyectada en 1918 para un acaudalado productor de sake, se aleja en su diseño del resto de su obra japonesa para acercarse a las características de su etapa californiana. Su singularidad se reflejó en su declaración como Bien de Interés Cultural en 1974.

A principios de los años ochenta, la casa, en estado de desidia, fue objeto de estudio y restauración. Posteriormente, el terremoto de Kobe de 1995 afectó seriamente al edificio, de manera que se debió emprender una nueva restauración.

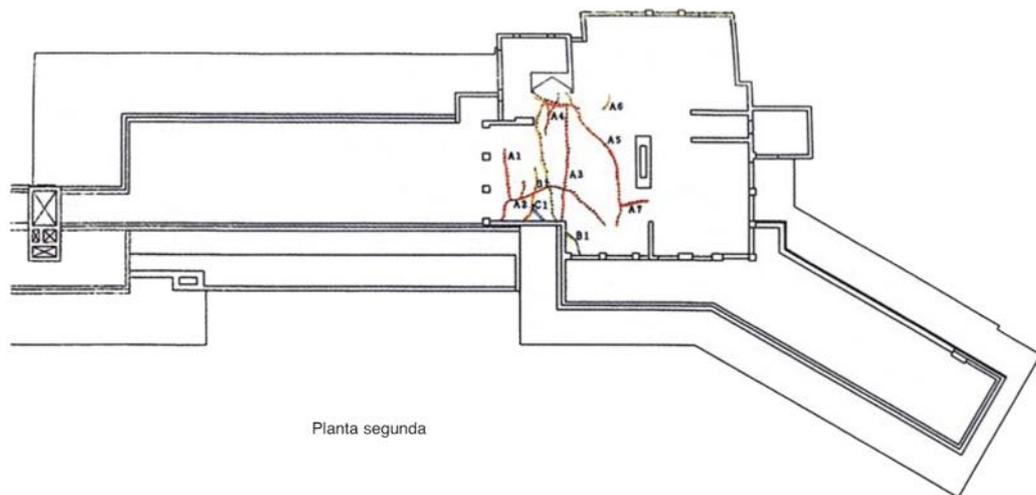
La casa Yamamura se asienta directamente sobre una colina, aprovechando la orografía existente. Tiene cuatro plantas en total, distribuidas en los tres cuerpos que configuran el conjunto del edificio: el pabellón sur posee dos plantas, el pabellón central otras dos, y el pabellón norte una sola. El pabellón sur linda en un extremo con un precipicio y en el otro con el pabellón central, del cual está separado por una de junta de dilatación que independiza los movimientos de ambos cuerpos en caso de terremoto. Asimismo, el pabellón norte se encuentra girado un ángulo de 30° respecto al pabellón central del edificio para adaptarse a la orografía del terreno.

En cuanto a la construcción, Wright empleó hormigón armado para las zonas estructuralmente más comprometidas; hormigón en masa prefabricado en obra en delgados bloques y después aparejado en muros de abundantes tendeles; y por último, entramados de bambú enlucidos con mortero de tierra y cal para la tabiquería interior. Los muros exteriores de cubierta, ligeramente inclinados hacia el interior, están contruidos con hormigón armado guarnecido con mortero de barro enriquecido con cal y enlucido finalmente con un mortero de cemento coloreado. En los extremos de la cubierta y alrededor de las ventanas se puede observar la ornamentación realizada en piedra de Oya.

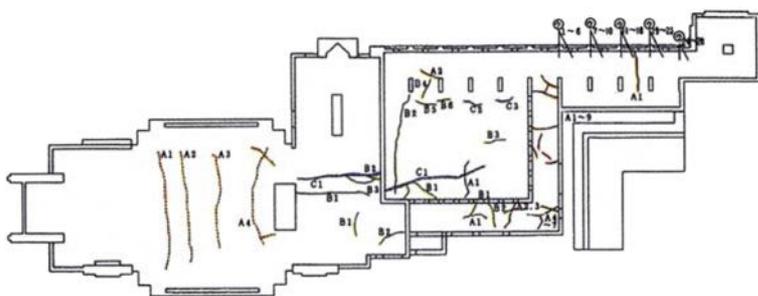
La construcción del edificio fue testigo del Gran Terremoto de la Región Kanto de 1923, que no le afectó por encontrarse a gran distancia de su epicentro. Sin embargo, en 1995, otro terremoto denominado de Kobe, sacudió la provincia japonesa de Hyogo con una intensidad de 7,2 grados en la escala de Richter, provocando daños en la estructura de la casa Yamamura.



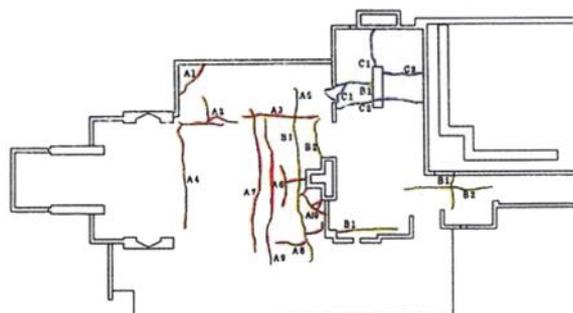
Planta tercera



Planta segunda



Planta primera



Planta baja

Mapeo de las lesiones en las losas de forjado

Los daños:

Tras el terremoto, se realizó un exhaustivo estudio de las lesiones del edificio así como varias pruebas para determinar la resistencia a esfuerzo laterales de la estructura. Se localizaron todas las grietas existente clasificándolas en función de su gravedad. Algunas de estas grietas fueron causadas por el terremoto, sin embargo, otras se debían al acero oxidado de las armaduras del hormigón.

En las losas de forjados, las lesiones estructurales más graves (grietas entre 5 y 10 mm) se concentraban en la solera de la planta baja y en la losa de la planta primera. El hormigón de estas dos zonas no poseía resistencia suficiente, ya que carecía de armadura en el primer caso y poseía únicamente 8 cm de espesor en el segundo.

Por otra parte, las lesiones aparecidas en algunas habitaciones de la planta segunda correspondían a una losa de forjado que poseía únicamente 6 cm de espesor y estaba armada con redondos de 6 mm de diámetro afectados por la corrosión. A pesar de estos daños, apenas existían lesiones provocadas por el esfuerzo cortante en la losa, por lo que cabe deducir que los muros de hormigón armado equidistribuidos en esta zona absorbieron con facilidad este esfuerzo cortante y evitaron mayores daños. Por el contrario, en la losa, las lesiones dominantes son debidas a la flexión por la ausencia de armadura suficiente y la acción combinada de las flechas en el alero y en el centro del vano en las habitaciones de estilo japonés.

En cuanto a los cerramientos, los daños muestran mayor gravedad en el pabellón sur del edificio y disminuyen de envergadura conforme nos acercamos al pabellón norte. La aparición de grietas en torno a la escalera principal indican que el pabellón sur del edificio basculó como un cuerpo rígido teniendo como centro de rotación la zona de la escalera. Se llegó a la conclusión de que la separación estructural de estos dos pabellones desempeñaba un deliberado rol antisísmico.

La característica composición de los muros según la tradición constructiva japonesa, con enlucido con una base amortiguadora de mortero de tierra, cal y paja, ha preservado a los cerramientos de abundantes lesiones superficiales, que únicamente surgieron en aquellos lugares donde se concentró especialmente la deformación, como es el caso de los encuentros entre muros.

A pesar de una distribución bastante uniforme de la afección del terremoto en el exterior del edificio, se puede observar la mayor gravedad en las lesiones en el pabellón sur, debido principalmente a la menor concentración de soportes en esta zona; la incapacidad de la piedra de Oya para absorber cualquier otro esfuerzo que no fuera la carga perpendicular; y a la inaptitud para asumir los esfuerzos laterales del terremoto del soporte del balcón del extremo sur del edificio, expuesto a oscilaciones libres en dirección este-oeste.

En cuanto a las lesiones del espacio interior, el muro norte de la entrada a planta baja fue donde aparecieron los daños más graves, con grandes grietas que dejaban al descubierto las armaduras. Este muro de hormigón se construyó como muro de contención, en una intervención posterior durante la vida del edificio, se excavaron estas tierras y se construyó un muro de ladrillo interno a 60 cm de distancia creando una cámara entre ambos muros, posiblemente por problemas de humedad. El terremoto destruyó el muro de ladrillo por la presión de la tierra y este derrumbe provocó las graves lesiones del muro de hormigón armado. Esta armadura del muro de hormigón mostraba una grave corrosión debida seguramente al contacto del acero con la humedad de la tierra y, por esta razón, la debilidad del muro fue mayor frente al empuje recibido por el derrumbe.

La intervención:

Gracias a las pruebas y los estudios realizados se pudo ver las propiedades antisísmicas intrínsecas de la configuración del edificio, que fue capaz de sobrevivir con daños leves, aun sometido a un terremoto terrible, con su solar en el ámbito de la falla activa del epicentro del mismo.

Previamente a la aplicación de las medidas estructurales de reparación se tomaron en cuenta las siguientes premisas: la innecesidad de un refuerzo integral de la estructura del edificio; la reparación de los elementos dañados en aras a la recuperación de la resistencia existente previamente al terremoto; la aplicación parcial de refuerzos estructurales (refuerzo de armaduras, adhesión de fibras de carbono...) únicamente en aquellos lugares donde la resistencia estructural se había mostrado insuficiente durante el terremoto; la necesaria inocuidad de estos refuerzos parciales sobre la configuración arquitectónica del edificio original; y el respeto de la deformación residual existente, que sólo se recuperaría a nivel de acabados superficiales.

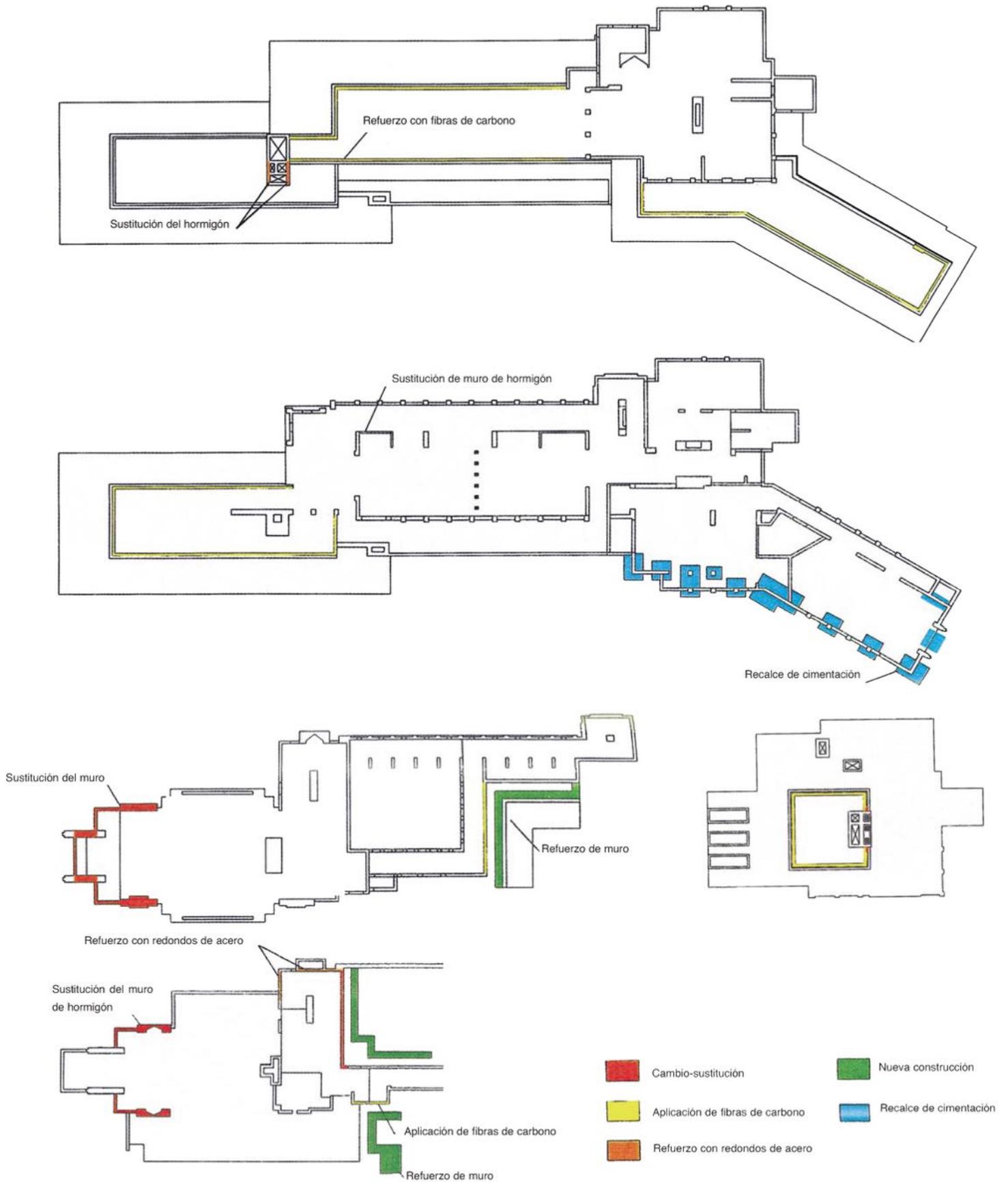
Se llevó a cabo un exhaustivo trabajo¹ a partir del cual se realizó un cálculo estructural preparatorio, se analizó la causa de las lesiones y se decidió la línea de intervención en función de las necesidades y del abanico de opciones posibles para un refuerzo estructural. Conforme avanzaba las labores para devolver su resistencia original al edificio, se realizaron diversas pruebas para valorar su capacidad de resistencia a esfuerzos laterales.

Las medidas adoptadas en la estructura se podrían clasificar en cinco categorías: recalce de cimentaciones, sustitución de elementos excesivamente deteriorados, nueva construcción de muros de contención, refuerzos con armadura de acero y aplicación de fibras de carbono.

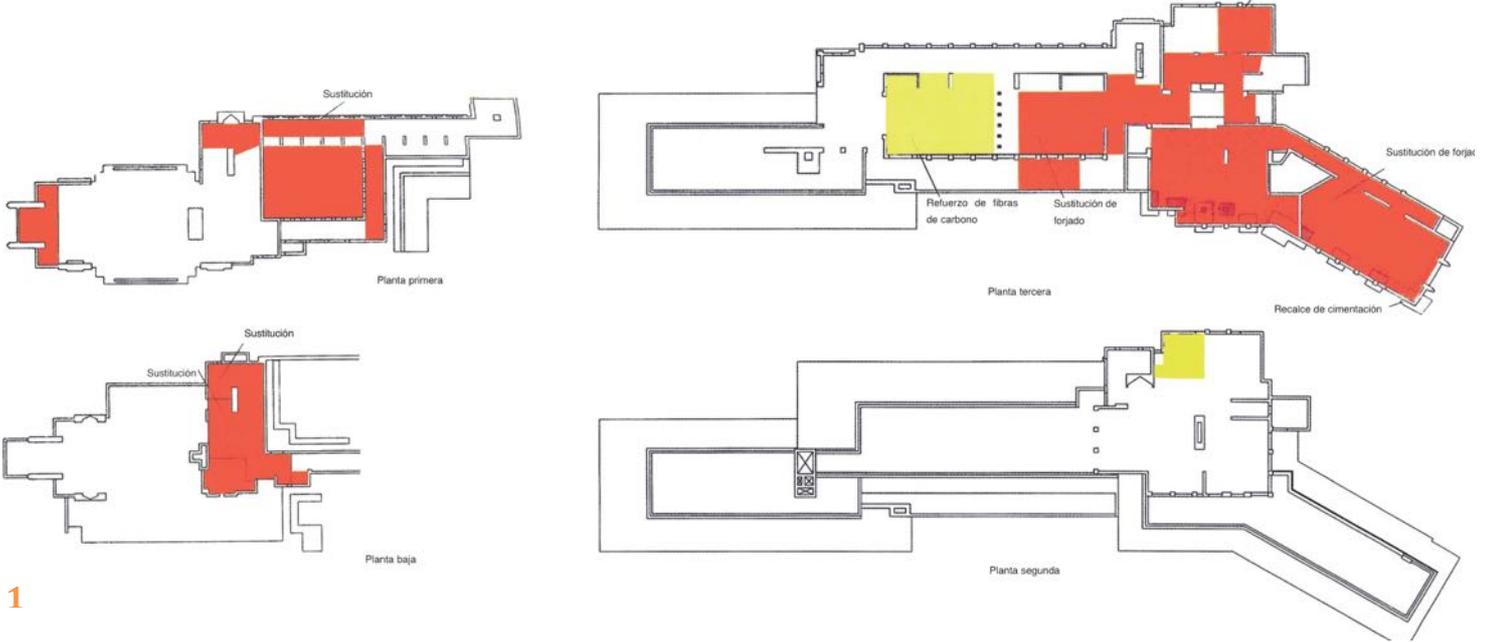
Esta obra fue una de las primeras en emplear fibra de carbono para refuerzo estructural de un edificio, ya que, como se ha explicado a lo largo del trabajo, fue a partir de este terremoto cuando se generalizó su uso en refuerzos estructurales frente a sismo.

Su uso es muy puntual: se coloca en el forjado de la sala de estilo japonés, ya que este solo disponía de 6 cm de espesor y su armadura estaba corroída, por lo que no podía resistir los esfuerzos a flexión. También se dispone en el muro norte del pasillo de la planta primera, ya que era un muro de contención de tierras que soportaba empujes laterales. Los maineles revestidos de piedra de Oya fueron reforzados desde el interior con de fibras de carbono. Igualmente, por último, se recurrió al refuerzo con fibras de carbono en los antepechos y el techo del almacén de la planta primera del pabellón central del edificio, con un acabado posterior en mortero de cemento.

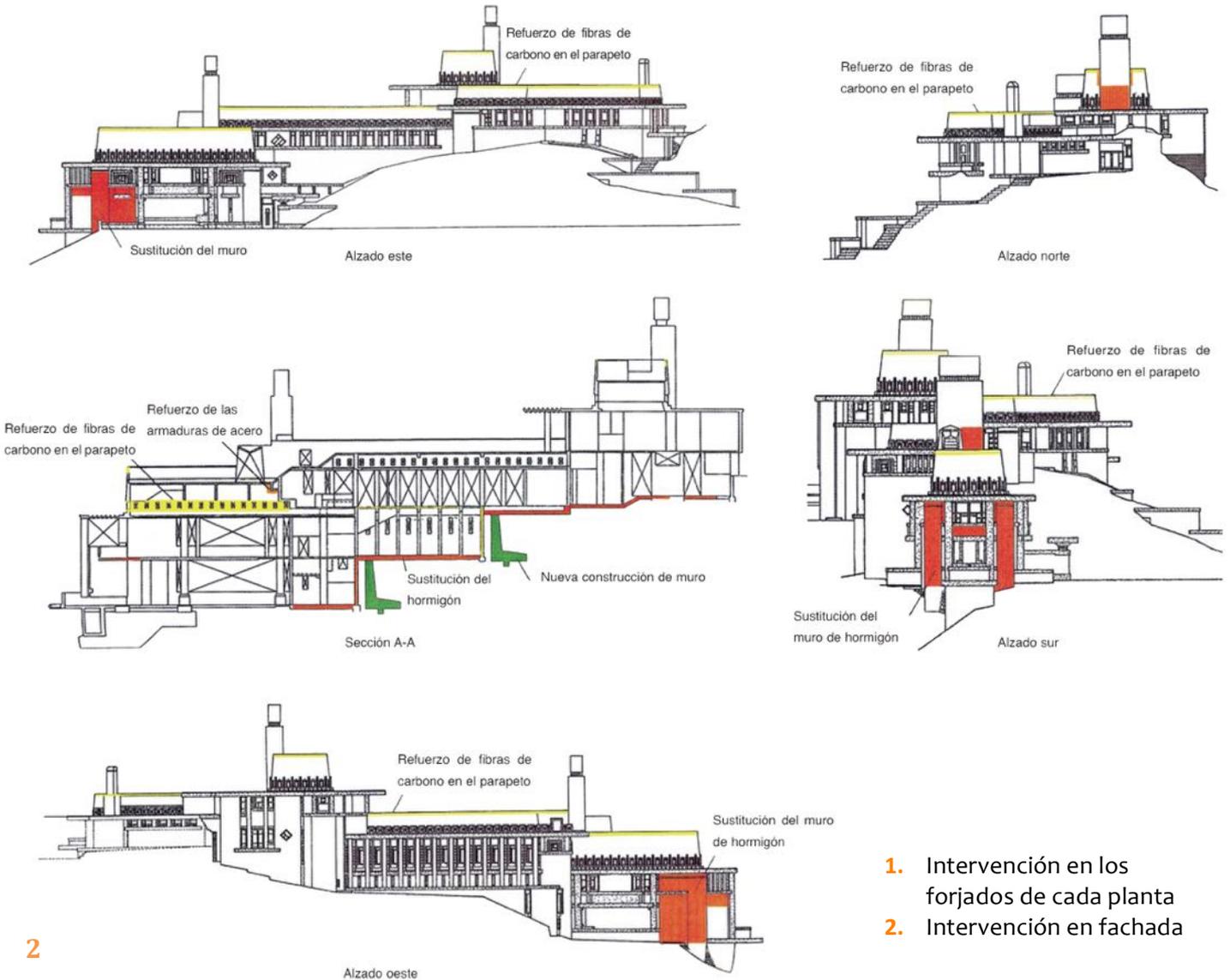
¹ Investigación de las características del terreno, medición del asentamiento del edificio, elaboración de una planimetría completa de las lesiones, medición de la torsión sufrida en cada parte del edificio, e investigación de las lesiones existentes en el revestimiento tanto interior como exterior. Igualmente, se realizó un estudio del grado de resonancia de los materiales que componen el edificio y de cada uno de los pabellones respecto al terreno sobre el que se asientan. Por último, se realizaron pruebas de las características físico-químicas y mecánicas del hormigón de la casa.



Intervención en muros y cimentación



1



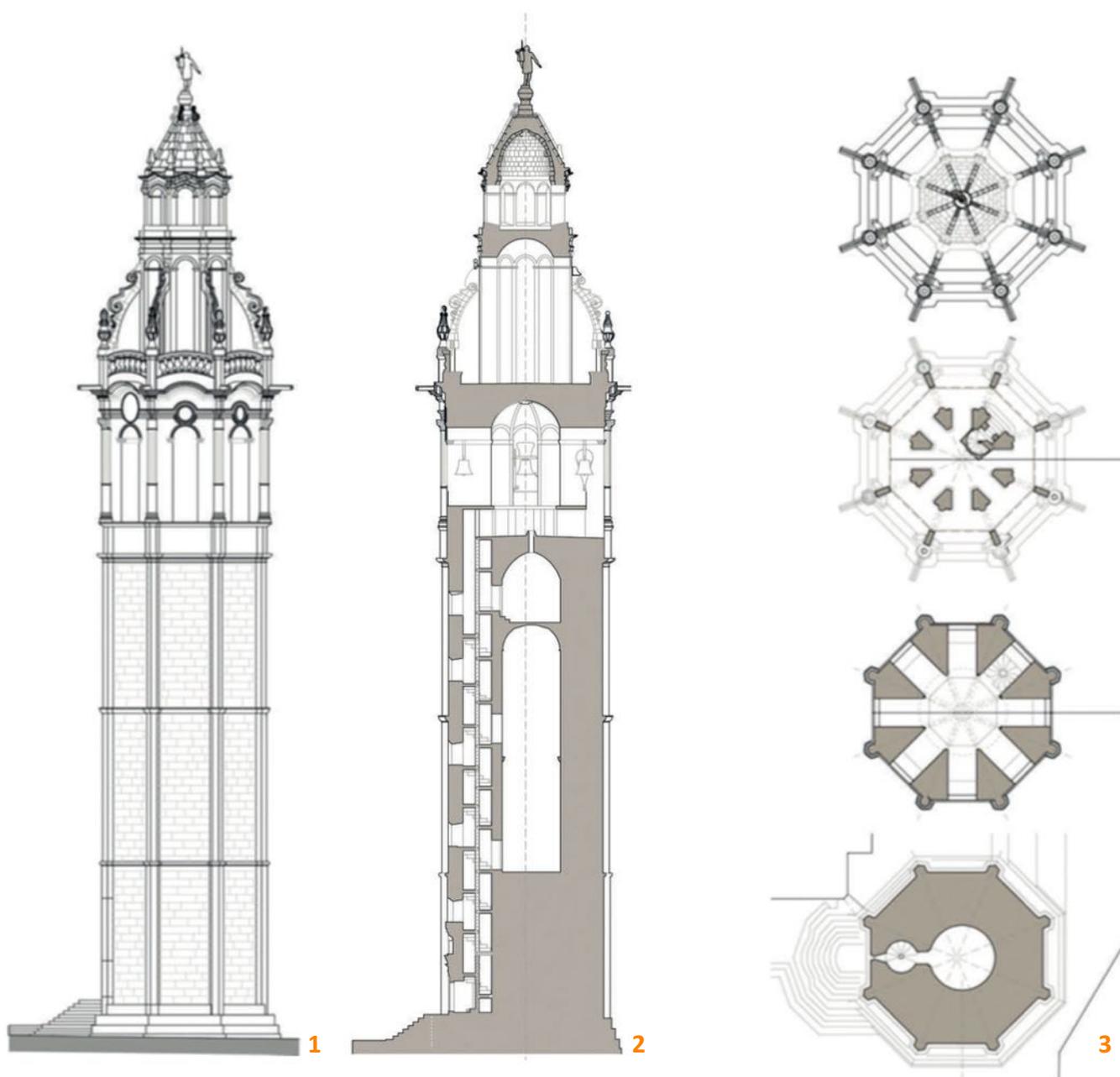
2

1. Intervención en los forjados de cada planta
2. Intervención en fachada

05.2

TORRE CAMPANARIO DE ALCALÀ DE XIVERT Valencia





1. Alzado general de la torre
2. Sección de la torre
3. Plantas

Obra: RECUPERACIÓN DE LA TORRE CAMPANARIO DE ALCALÀ DE XIVERT

Ubicación: Alcalà de Xivert, Castellón (España)

Año construcción: 1784 -1803

Autor/es: Juan Barceló y Blas Teruel

Año intervención: 2010

Autor/es: Rafael Soler Verdú y Alba Soler Estrela

Productos FRP empleados:

Láminas de fibra de carbono

Varillas de fibra de vidrio

Resinas epoxi

Varillas de fibra de carbono

Uso característico del FRP:

Alternativa al uso de otros materiales incompatibles con la piedra original.

El edificio:

Se trata de una construcción exenta ubicada junto a la fachada principal de la iglesia parroquial de San Juan Bautista. Es el monumento más emblemático de la población, no sólo por ser una de la torres más altas de todo el territorio, sino por la belleza de su arquitectura tardobarroca.

Las obras se iniciaron en 1783, diecisiete años después de consagrado el templo, con diseño y dirección del prestigioso maestro de obras Juan Barceló, oriundo de la localidad. Originariamente contemplaba la construcción de otra torre en el lado contrario de la fachada, pero que nunca llegó a edificarse por el inicio de la Guerra de Independencia. Tras el fallecimiento de Barceló, la obra fue rematada por el maestro de obras Blas Teruel, al que se debe la parte superior del campanil.

La torre dispone de una planta octogonal de 27 metros de perímetro y una altura total de 68 metros, lo que la convierte en una de las más altas de la Comunidad Valenciana. Su forma prismática se encuentra reforzada con contrafuertes en los ángulos, dividiéndose horizontalmente en cuatro cuerpos mediante cordones pétreos. El último cuerpo, el de campanas, se sustituyen los contrafuertes por columnas semiempotradas entre las que se abren vanos con arcos de medio punto en los que se alojan las campanas.

El remate, o campanil, se compone de dos cuerpos octogonales superpuestos con huecos de medio punto y semicolumnas en los ángulos. Esta estructura se asegura estática mediante ocho arbotantes de arco tendido con su trasdós tallado en forma de complicada voluta, quizás uno de los elementos más característicos de esta torre.

En la cima de la torre se encuentra la escultura de San Juan Bautista, titular del templo, realizada en madera recubierta de plomo en 1901 por el artesano local Juan Bosch. Esta figura sustituía a la pieza anterior, un ángel de madera, destruida por un rayo en 1886.

En septiembre del 2007, la torre campanario fue declarado Bien de Interés Cultural.

4



Garras de acero



Lámina de FRP

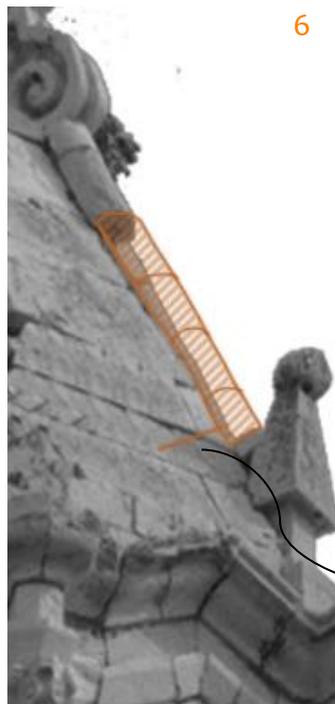


5



- 4. Arquitrabe: estado anterior, durante y posterior a la intervención respectivamente
- 5. Estado inicial de la torre
- 6. Reposición de bordones y anclaje con barras de FRP

6



Barra de FRP

Los daños:

El Informe Técnico suscrito por la Unidad de Inspección de Patrimonio Artístico, determinó que el estado de conservación tanto de la torre como de la escultura de San Juan Bautista que la remataba era muy deficiente, ofreciendo disgregación de la piedra, falta de sillería y mortero de unión en las juntas, grietas, y otras patologías. Todo ello con grave peligro de caída de piedras a la vía pública.

El estado del cuerpo superior preocupaba por su alarmante situación. Algunas piedras apenas mantenían su estabilidad y estaban en peligro de desprenderse y caer desde gran altura (de hecho, unas cuantas ya habían caído). La escultura de San Juan Bautista oscilaba sobre su peana de piedra fisurada.

Además de los graves problemas que afectaban a la estabilidad de algunos elementos, se observó un proceso generalizado de deterioro que afectaba a la piedra: costras negras, líquenes, oxalatos y numerosas fisuras que reflejan la estructura veteada de la piedra que propicia su fractura. El mal se extendía por toda la torre y era especialmente preocupante en los elementos decorativos por el peligro de desprendimiento de fragmentos y caída.

Muchos de esos problemas de estabilidad eran debidos a la incompatibilidad entre el hierro empleado hace más de un siglo como anclaje de elementos y la piedra. Al oxidarse, el metal aumentan su volumen provocando grietas y roturas completas en la piedra.

La intervención:

La intervención era imprescindible para garantizar la seguridad de las personas, por lo que la primera fase de restauración se centró en resolver los problemas de estabilidad y consolidación del cuerpo superior del campanario. A esta le siguió una intervención que incide y potencia la lectura arquitectónica del monumento, pero que no es de interés para este trabajo.

La actuación fue de máximo respeto a la materialidad del monumento, una intervención de conservación, intencionadamente de mínima incidencia formal, de consolidación. Se trabajó con técnicas tradicionales, empleando materiales como piedra, madera, plomo, cales hidráulicas naturales, o yeso; pero también con materiales de vanguardia como varillas de fibra de vidrio o láminas de fibra de carbono, resinas o elastómeros.

El uso de los compuestos de fibra de vidrio y de carbono en esta obra ha sido para fijar, coser o anclar los diferentes elementos ornamentales y cornisas para mejorar su estabilidad. Las propiedades mecánicas de los compuestos son suficiente elevadas respecto a las de trabajo o comportamiento real; pero la elección de estos materiales no se debe a dichas propiedades mecánicas sino a sus resistencias a la corrosión y su compatibilidad química con la piedra de la torre.

Se colocan en sustitución de las barras de acero originales debido a que estos compuestos son materiales inertes y resistentes a la corrosión, resolviendo así las incompatibilidades existentes con la piedra.

El deterioro de la piedra se extendía a todos los paramentos y con mayor intensidad a los elementos ornamentales. Las esferas que remataban los arbotantes, ancladas con barras de hierro, estaban reventadas, con numerosas fisuras con tendencia a rotura. En varios jarrones se habían colocado unas pletinas de hierro forjado abrazándolos al arbotante. En los dos puntos de anclaje, el hierro había reventado la piedra ya que el relleno de mortero no resolvía los problemas de incompatibilidad de la unión directa hierro-piedra.

Se desmontaron las pletinas saneando el daño ocasionado en la piedra y se ejecutaron microcosidos entre la pieza de los elementos decorativos para mejorar la estabilidad

colocando varilla de fibra de vidrio y de carbono. Posteriormente se procedió al tratamiento de la piedra con la eliminación de costras y el saneado y relleno de juntas.

Se aplicó el mismo protocolo de tratamiento de la piedra y microcosidos en el entablamento del campanil, pero además requirió una especial intervención. En el arquitrabe los sillares estaban unidos entre sí mediante garras en forma de U con la intención de realizar un encadenado que estabilizara el cuerpo superior frente a las acciones horizontales. Al igual que en los elementos ornamentales, la oxidación del hierro estaba rompiendo la piedra.

La solución adoptada consistió en la disposición de un nuevo anillo mediante el uso de una lámina de fibra de carbono anclada y adherida a la piedra, protegida con capas de mortero de cal armado con malla y despiezado para evitar fisuras por retracción.

La cubierta piramidal presentaba graves anomalías, faltaban algunas losas que conformaban los planos de evacuación, y varias de las piezas que resolvían los límites habían desaparecido o estaban dañadas. Se procedió a reponer los bordones caídos sobre lecho de mortero de cal hidráulica y, para aumentar la seguridad frente a deslizamiento, se ancló con varillas de fibra de vidrio y de carbono a las losas y se conectó en todo el perímetro la primera hilada de sillares mediante el clavado de varillas de fibra.

Complementariamente se llevó a cabo una limpieza general de los faldones, eliminación de líquenes, consolidación, tratamiento de juntas y protección final. El pináculo, inestable después de su consolidación, se fijó al soporte introduciendo anclajes de varilla de fibra de carbono, impregnando la varilla mediante resina y sellado con mortero epoxi.

En la peana se procedió a la limpieza de la superficie mediante brochas y cepillos, eliminación de líquenes, consolidación de microfisuras, protección y repaso final. Se procedió igualmente al tratamiento de las juntas y a la eliminación del anclaje de hierro oxidado, así como a la estabilización de las cartelas y la peana mediante la conexión con varillas de fibra de carbono impregnadas en resina. La grieta vertical de la esfera sobre la que descansa la escultura, la más preocupante, fue sellada mediante inyección interior con mortero epoxídico.

05.3

PALAZZO LELY L'aquila (Italia)



PRINCIPALES TERREMOTOS EN ITALIA EN LOS ÚLTIMOS 20 AÑOS



Obra: RECONSTRUCCIÓN DEL PALAZZO LELY

Ubicación: L'Aquila (Italia)

Año construcción: Siglo XVIII

Autor/es: Desconocido

Año intervención: 2011-2013

Autor/es: Piero Paoloni y Francesco Laurini

Productos FRP empleados:

Tejido de fibra de carbono

Resinas epoxi

Mechas de fibra de carbono

Parrilla de fibra de vidrio

Uso característico del FRP:

Refuerzo frente a sismo en muros de fábrica y elementos abovedados.

El edificio:

El territorio italiano es una de las zonas sísmicas más activas de Europa, y frecuentemente es golpeado por terremotos que dañan el parque de viviendas en mayor o menor medida. El 6 de abril de 2009, un temblor de 6,7 en la escala Richter sacudió el pueblo de L'Aquila, en el centro de Italia, dejando más de 300 muertos, 1.500 heridos y 50.000 habitantes sin casa.

Varios edificios del casco antiguo de L'Aquila colapsaron. El estudio de la habitabilidad de los edificios después del sismo reflejó que el 92% de estos se clasificaban como edificios no aptos por riesgo estructural o geotécnico (clasificación E), mientras que solo el 8% restante eran aptos para su uso con las medidas de intervención de emergencia (Clasificación B/C)².

Gran parte de los edificios más dañados eran obras de gran valor patrimonial, situadas en el casco histórico de la ciudad, y que respondían a una tipología estructural de fábrica de ladrillo. Al ser edificios históricos, se decidió que la mayoría de ellos fueran reconstruidos (61%), pero otros muchos tuvieron que ser demolidos (39%).

Uno de estos edificios que presentaba grandes daños estructurales era el Palazzo Lely, uno de los edificios históricos más antiguo del centro de L'Aquila. Este edificio perteneció a la familia noble de los Caracciolo, pero después del terremoto de 1703, paso a ser propiedad de la familia Paolini. Se trata de una residencia de propiedad privada, declarado Bien Monumental tutelado desde el 2004, por lo que está limitado por la Superintendencia de Bienes Artístico y Arquitectónicos.

En su interior dispone de muchos elementos de interés arquitectónico, importantes frescos, e incluso una capilla privada, que los propietarios tienen la obligación de poner a disposición del público para visitas y servicios religiosos.

² Datos obtenidos del documento *L'Ufficio Speciale per la ricostruzione di L'Aquila. Monitoraggio della ricostruzione a L'Aquila nei centri storici: aspetti tecnici ed economici.*

Los daños:

Durante el terremoto de 2009, el edificio sufrió graves daños: diferentes colapsos en las bóvedas, deterioros en los frescos de las mismas, muros agrietados y un gran abultamiento de la fachada que se inclinaba unos 25 cm hacia el exterior. Todo ello colocaba al edificio en una situación muy delicada estructuralmente, que requería una intervención radical para evitar su derrumbe, y más aún con las numerosas replicas que se registraron.

En un sismo, las bóvedas son unos de los elementos más perjudicados, ya que al recibir esfuerzos laterales se pueden producir grietas longitudinales en la clave por el intradós y en los riñones por el trasdós.

La intervención:

Entre 2009 y 2010, la ciudad de L'Aquila fue recuperándose poco a poco y comenzaron las labores de consolidamiento y refuerzo de los edificios afectados. La intervención del Palazzo Lely comenzó en 2011 y tuvo una duración total de 18 meses.

Previo a la intervención de refuerzo estructural en el Palazzo Lely, se realizaron una serie de ensayos y estudios para determinar el grado de deterioro de la fábrica y con ello, elegir el sistema más adecuado para su reparación. Para ello, se vació por completo el edificio, eliminado hasta los suelos y protegiendo las pinturas.

Al tratarse de un edificio valor patrimonial, la intervención debía ser lo más cuidadosa posible, asegurando la seguridad estructural pero sin ser agresiva con la edificio ni añadir peso excesivo al mismo. La solución adoptada consistió por un lado, en intervenciones de reparación de aquellos elementos con daños de diversas consideraciones, y por otro, en el refuerzo de las bóvedas mediante el uso de bandas de fibra de carbono (CFRP) y cemento aligerado para recuperar sus resistencia original y reducir la vulnerabilidad sísmica.

Estas bandas se colocaron sobre la superficie limpia libre de rugosidades, a modo de nervios en las bóvedas. Al ser necesarias más de una capa de FRP, se dispusieron mechas de fibra de carbono para conectar todas las capas entre sí y a la estructura. Por último se espolvoreó arena de cuarzo para crear la rugosidad necesaria para el recubrimiento posterior con morteros.

Los arcos también fueron reforzados a cortante mediante bandas de fibra de carbono y resina epoxi. En cuanto a las paredes, se realizaron inyecciones y, para evitar un posible vuelco en caso de otro terremoto, se reforzaron con rejilla de fibra de vidrio y una matriz cementosa. Para la completa conexión de este refuerzo al muro se emplearon mechas de fibras de carbono impregnadas en resina epoxídica.



Colocación de la fibra de carbono en diferentes elementos

05.4

EDIFICIOS AFECTADOS POR EXPLOSIÓN DE GAS Palencia





Obra: CONSOLIDACIÓN ESTRUCTURAL EN EDIFICIOS AFECTADOS POR EXPLOSIÓN DE GAS

Ubicación: Palencia (España)

Año construcción: 1960

Autor/es: Desconocido

Año intervención: 2007-2008

Autor/es: José Santos Torres

Productos FRP empleados:

Láminas de fibra de carbono

Resinas epoxi

Uso característico del FRP:

Refuerzo a flexión sin aumentar el peso de la estructura ni disminuir la altura libre.

El edificio:

El 1 de Mayo de 2007 tuvo lugar una trágica explosión de gas en la calle Gaspar Arroyo 4 de Palencia, que se saldó con la muerte de nueve personas y más de una treintena de heridos. Como consecuencia de la explosión, se produjo el colapso del edificio número 4 y parte de los colindantes (números 2 y 6 de la misma calle), además de daños en los edificios próximos.

Los edificios fueron construidos en la década de 1960 y están constituidos por una estructura a base de pórticos de hormigón armado en la planta baja y muros de carga de fábrica de ladrillo en el resto de plantas.

Los inmuebles situados en los números 3, 5 y 7 de la calle presentaban daños importantes por lo que se recurrió a la consolidación y refuerzo de su estructura.

Los daños:

Los daños registrados en los inmuebles situados enfrente al edificio donde se originó la explosión eran bastante significativos. Las vigas mostraban fisuras, en el bloque 5 se había producido el hundimiento del forjado sanitario, y los voladizos presentaban fisuras y deformaciones.

Al tratarse de una obra de reparación de estructura, no se debían modificar las superficies útiles ni construidas de la edificación, no siendo necesario variar la edificabilidad ni la ocupación iniciales.

En este tipo de reparación era fundamental reforzar la estructura de los pórticos de la planta baja y de los voladizos, llevándola a cabo con unos materiales y sistemas que permitieran una rápida ejecución.

La intervención:

Se optó por la inyección de fisuras con resina, reparaciones mediante morteros y el refuerzo estructural mediante laminados de fibra de carbono, sistema elegido por su rapidez de ejecución, escaso peso propio y no disminución de alturas libres de planta.

Previo a la disposición de las láminas de fibra de carbono, se procedió a reparar los defectos constructivos. Se retiraron todos los revestimientos de la estructura porticada de planta baja y de las vigas de apoyo del forjado de las plantas de viviendas, y se procedió al saneado del hormigón deteriorado, a la pasivación de las armaduras y la restitución de la sección original mediante un mortero de reparación.

Con esto se consigue unas condiciones mínimas necesarias de resistencia a tracción y superficies lisas y secas en los elementos a reforzar.

En las vigas de la planta baja y vigas de apoyo del forjado se detectaron fisuras que fueron reparadas mediante la inyección de resinas. Para el refuerzo de estas vigas a flexión positiva se colocaron laminados pultrusionados de fibra de carbono en la cara inferior de las vigas. Debido a su bajo peso, los laminados no necesitan ser apeados y se sostienen en el soporte desde el principio.

En los balcones de las viviendas orientados a la calle Gaspar Arroyo, hubo de realizarse un refuerzo a flexión negativa. Este refuerzo consistió en la colocación de los laminados de fibra de carbono en la cara superior de los voladizos coincidiendo con la alineación de las viguetas, y que se conectan con el muro de carga mediante un cajeadado en el que se insertan las láminas.

Los elementos reforzados con fibra de carbono se protegen contra la acción del fuego aplicándose un mortero de vermiculita y un solado (mortero de asiento y pavimento) en los vuelos.

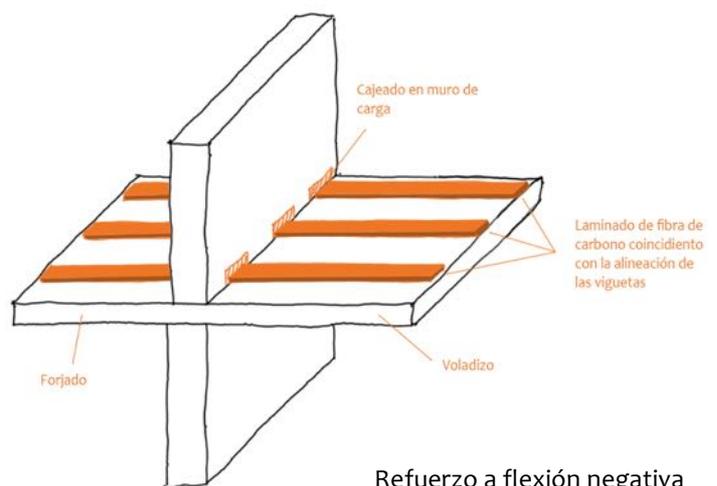
Esta solución con laminados de fibra de carbono, no sólo presenta ventajas en cuanto a su bajo peso y su escaso espesor, sino que además, el adhesivo de resina epoxi tan solo necesita siete días para conseguir el endurecimiento total, por lo que los tiempos de ejecución se reducen considerablemente respecto a otras soluciones.



Estado de degradación de a estructura



Refuerzo a flexión positiva



Refuerzo a flexión negativa

05.5

BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE DEUSTO Bilbao





Plantas y sección de la biblioteca

Obra: REFUERZO ESTRUCTURAL EN LA BIBLIOTECA DE LA UNIVERSIDAD DE DEUSTO

Ubicación: Bilbao (España)

Año construcción: 2005-2009

Autor/es: Rafael Moneo, NB 35 (ingeniería)

Año intervención: 2007

Autor/es: Rafael Moneo, NB35 (ingeniería)

Productos FRP empleados:

Láminas de fibra de carbono

Resinas epoxi

Uso característico del FRP:

Refuerzo ante un cambio de la estructura proyectada

El edificio:

El Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) de la Biblioteca de la Universidad de Deusto se ubica en la nueva zona de Abandoibarra, mirando al Museo Guggenheim y muy cercano a la Ría.

Las obras comenzaron en el año 2005, tras una complicada y lenta primera fase de excavación; el resto de los trabajos han ido a un buen ritmo hasta su inauguración en Enero del 2009.

El elemento primordial de este proyecto es fachada formada por un bloque de vidrio que permite la entrada de luz natural al interior. Proyectó el edificio como un volumen monolítico y monocromo con las puntas redondeadas, funcional, claro, para que los estudiantes y los investigadores disfruten de la máxima comodidad, o para que en su cafetería, a pesar de estar a nivel de la calle, la luz sea una característica primordial.

Para conseguir esa claridad de formas, y esos espacios abiertos e iluminados, se proyectaron plantas de doble altura y con grandes luces para los espacios principales, de las que cuelgan las entreplantas de la zona de servicio.

Los daños:

En este proyecto no existen daños estructurales que precise un refuerzo, sino más bien, un cambio en la tipología estructural que se había proyectado y calculado, y que obligó a la existencia de dicho refuerzo.

En un primer momento, la estructura de las entreplantas estaba proyectada como estructura metálica que apoyaba sobre los forjados de los espacios principales de hormigón armado. Pero en una decisión posterior durante la construcción, se cambió esa estructura metálica por una losa de hormigón, generando un incremento de carga en los forjados en los que se apoyan, con lo que los esfuerzos a flexión eran mayores de los previstos inicialmente.

La intervención:

Debido a este aumento de la flexión, se hubo de ejecutar un refuerzo de la estructura mediante la aplicación de laminados pultrusionados de fibra de carbono. Esta solución fue pegada al soporte mediante resinas epoxídicas con el objeto de conformar una armadura externa.

Para este tipo de obra, esta solución es la más adecuada gracias a sus considerables ventajas como bajo peso, altas resistencias, gran rigidez, buena resistencia a fatiga (casi ilimitada), buena resistencia a la fluencia, dureza superficial y tolerancia a daños, resistencia química, estabilidad dimensional con bajo coeficiente de dilatación térmica, resistencia a la corrosión y baja resistencia eléctrica, entre otras.

Antes de la colocación de la lámina, se realiza la limpieza de superficies mediante medios mecánicos y manuales para, a continuación, colocar el sistema de refuerzo, de 8 cm de ancho y 1,2mm de espesor, con el adhesivo de resina epoxi.

El corte del laminado en las longitudes deseadas se realiza en la propia obra y, una vez limpias las superficies, se procede a la aplicación sobre el soporte de una película de la resina epoxi.

En un primer momento se coloca el laminado sin ejercer presión hasta que se comprueba que está perfectamente situado en su sitio, para posteriormente presionar mediante un rodillo de goma dura que se irá pasando a lo largo de toda la longitud.



1



2



3



4

PROCESO DE COLOCACIÓN DEL FRP

- 1 Preparación de la superficie
- 2 Corte en obra del laminado
- 3 Colocación del laminado
- 4 Resultado final

06

CONCLUSIONES

CONCLUSIÓN

Como se ha visto en los casos estudios, la decisión de reforzar una estructura depende de muchos factores: del interés arquitectónico, del nuevo uso, de los costes derivados de alargar su vida útil, etc. La elección de los materiales y sistemas a emplear puede ser según numerosos criterios técnicos y económicos. Frente a materiales utilizados tradicionalmente, como hormigón o acero, los compuestos presentan ciertas ventajas pero también ciertos inconvenientes que son necesarios conocer bien.

En cuanto a las ventajas, la fibra de carbono tiene unas propiedades mecánicas mejores que las del acero, ya que su resistencia a tracción es de casi nueve veces la del acero, y su densidad es cuatro veces menor. Estos indican que los compuestos de fibra de carbono tienen una resistencia específica de casi 40 veces mayor que la del acero. En el caso de otro tipo de fibras, por ejemplo vidrio, la capacidad última es también comparable a la del acero pero su rigidez es mucho menor.

El bajo peso de los compuestos genera además otras ventajas como la economía y facilidad de transporte, facilidad de manipulación y montaje (particularmente importante cuando se aplica en zonas de difícil acceso), y reducción de cargas muertas.

El material compuesto no necesita juntas, las piezas se colocan directamente sobre el hormigón en toda su longitud, e incluso es posible superponer diferentes láminas de compuesto. Es una solución muy competitiva, por ejemplo, cuando se debe reforzar bidireccionalmente, ya que el bajo espesor del material permite que los recrecidos no alteren significativamente el aspecto superficial en cuanto a nivelación y grosores.

Una gran ventaja del material compuesto es su adaptabilidad a la superficie, especialmente en el caso de las soluciones con textiles, ya que son capaces de adaptarse a las superficies curvas, las irregularidades, etc. En el caso de cúpulas, o arcos la solución es muy competitiva con respecto al acero.

También tiene un excelente comportamiento ante la corrosión ambiental, lo que le hace muy apropiado para aplicaciones costeras y marítimas, aplicaciones en ambientes agresivos con mantenimiento prácticamente nulo.

Los materiales, fibras y resinas, tienen una alta durabilidad y requieren de muy poco mantenimiento. Si en servicio resultan dañados, es relativamente fácil repararlos añadiendo una nueva capa, sin que esto conlleve el incremento significativo de peso de la estructura ni de las dimensiones del elemento.

Pero a pesar de presentar todas estas ventajas, también tiene algunas debilidades, como el riesgo a incendios. Las fibras de carbono aguantan temperaturas altas, pero las resinas (termoestables en su gran mayoría) empiezan a degradarse a partir de los 50-80°C. Los daños producidos pueden reducir el factor de seguridad y en el peor de los casos producir el colapso.

El hecho de que sean materiales relativamente novedosos hace que no exista la experiencia suficiente para determinar su comportamiento a largo plazo, y por tanto, en este sentido la durabilidad real es desconocida. Esto puede ser una desventaja de cara al diseño con una estimación de larga vida.

Otra de las desventajas actuales es la poca experiencia de aplicaciones y la necesidad de contar con trabajadores especializados para su puesta en obra. Además, el uso de las resinas y la emisión de sustancias tóxicas pueden representar riesgos importantes para la salud de estos trabajadores aplicadores. Este aspecto queda solucionado con el uso de los

materiales preconformados, que reducen de forma drástica los riesgos sobre los trabajadores ya que solo se manipula el adhesivo y no la confección de toda la pieza.

Otro aspecto de gran relevancia hoy en día es el impacto medioambiental y la sostenibilidad de estos materiales. La cantidad de CO₂ emitido³ en la fabricación de la fibra de carbono es muy elevada en comparación con otros materiales, pero es cierto que los valores globales se reducen un poco ya que en el transporte causa el mínimo impacto.

También hay que tener en cuenta que, debido al uso de resinas termoestables, la reciclabilidad de estos materiales es muy complicada y costosa.

Pero sin duda, los mayores inconvenientes de los refuerzos FRP son, por un lado, la falta de una normativa nacional, que generan una sensación de inseguridad al emplear estos materiales; y por otro, el alto coste del material. No obstante, se trata de problema de economía de escala, ya que a mayor uso, mayor producción y reducción de costes. Además, según el proyecto a realizar, este elevado coste se ve compensado en los costes de transporte, puesta en obra y mantenimiento.

Por lo tanto, no cabe una conclusión simplista en la se determine si los materiales frp son “buenos” o “malos”, sino que, en la elección de los sistemas de refuerzo estructural intervienen muchos factores a tener en cuenta, y cuanto mayor sea nuestro conocimiento sobre las opciones posibles, mejor será la solución a la que lleguemos.

³ La empresa Torai, fabricante de fibra de carbono, cifra este dato en 20 toneladas de CO₂ emitido para fabricar 1 tonelada de fibra.

07

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

- Monjó Carrió, Juan; Maldonado Ramos, Luis. *Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas*. Madrid : Munillalería, 2001. ISBN 84-89150-47-8
- Recuero, A.; Gutiérrez Jiménez, J. P.; Miravete, A.; Cuartero, J. “Refuerzo de estructuras con composites avanzados”. *Informes de la construcción*, ISSN 0020-0883, Vol. 49, N°. 452, 1997, págs. 39-50
- Miravete, Antonio. “Materiales compuestos en la construcción: introducción”. *Materiales de construcción*, ISSN 0465-2746, N°. 247-248, 1997, págs. 5-10
- Jiménez, Miguel A.; Castejón, Luis; Miravete, Antonio. “Materiales compuestos realizados a partir de nuevas tecnologías textiles”. *Materiales de construcción*, ISSN 0465-2746, N°. 247-248, 1997, págs. 83-92
- Recuero, Alfonso; Miravete, Antonio. “Proyecto sobre refuerzo de estructuras con composites avanzados: presentación de proyecto”. *Materiales de construcción*, ISSN 0465-2746, N°. 247-248, 1997, págs. 107-110
- Chiminelli, A.; Miravete, Antonio. “Una nueva fibra de características ideales para su uso en la construcción” *Informes de la construcción*, ISSN 0020-0883, Vol. 57, N°. 498, 2005, págs. 25-30
- Miravete, Antonio; Castejón, Luis. “Materiales compuestos”. *Temas de disseny*, ISSN 0213-6023, N°. 20, 2002, pág. 6
- Miravete, Antonio. “Hacia la fibra de carbono en la construcción”. *Materiales de construcción*, ISSN 0465-2746, N°. 263-264, 2001, págs. 55-70
- Manso, Juan. “Los composites y la construcción: su ayer, hoy y mañana”. *Materiales de construcción*, ISSN 0465-2746, N°. 247-248, 1997, págs. 93-102
- Norma europea EN 1504. *Productos y sistemas para la reparación y protección de estructuras de hormigón*.
- Barbat, Alex H.; et al. *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. 1º edición. OmniaScience, 2014. ISBN: 978-84-941872-9-2
- CNR-DT 200 R1/2014. *Guía para el Diseño y Construcción de Sistemas FRP Pegados Externamente para el Reforzamiento de Estructuras Existentes*
- Revuelta Crespo, David. “Propiedades de los materiales compuestos”. *La innovación en las técnicas, los sistemas y los materiales de construcción*. CEMCO 2007, Volumen IV, 2007, págs.1-21
- G. Pulido, M Dolores; Pons Gabarrón, Jordi. “Refuerzo de estructuras con materiales compuestos”. *La innovación en las técnicas, los sistemas y los materiales de construcción*. CEMCO 2007, Volumen IV, 2007, págs.21-37
- Alonso Izquierdo, Jesús. *Guía práctica de refuerzo de sistemas estructurales*. Master en edificación. Trabajo fin de Master. Escola Politècnica Superior d’Edificació de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.

- Picazo Iranzo, Álvaro. *Estudio experimental del comportamiento a esfuerzo cortante de vigas de hormigón reforzadas con fibra de carbono*. Master oficial Técnicas y sistemas de edificación. Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica. Universidad politécnica de Madrid Junio de 2010
- Catálogos de productos y sistemas FRP. www.drizoro.com/
- Catálogos de productos y sistemas FRP. <https://esp.sika.com/>
- Catálogos de productos y sistemas FRP. www.mapei.com/es-es/
- Catálogos de productos y sistemas FRP. www.kerakoll.com/es/

