



SESIÓN TÉCNICA MONOGRÁFICA Nº 1

REFUERZO DE ESTRUCTURAS MEDIANTE FIBRA DE CARBONO



REFUERZO DE ESTRUCTURAS MEDIANTE FIBRAS DE CARBONO

Autores:

Capítulo 1: Ramón Martínez Martínez, Ingeniero de Caminos (SIKA S.A.)

Capítulo 2: José Eugenio Herrero, Ingeniero de Caminos (DRIZORO)

Capítulo 3: David Revuelta, Dr. Ingeniero Industrial (IETcc)

Capítulo 4: Esther Zaballa Lasala, Ingeniero de Minas (SIKA S.A.)

Coordinación y edición:

Jorge Conde Conde, Arquitecto (ACIES)



ÍNDICE

1. APLICACIONES DEL PRODUCTO, COSTE E IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO	4
1.1. BREVE HISTORIA	4
1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA	5
1.3. CAMPO DE APLICACIÓN	6
1.4. COSTE DE LA SOLUCIÓN Y COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS.....	7
1.5. IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO ESPAÑOL	9
1.6. PROYECCIÓN FUTURA.....	10
2. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO.....	11
2.1. NORMATIVA VIGENTE, PRESENTE Y FUTURA.....	11
2.2. CARACTERÍSTICAS MECANICAS DE LOS MATERIALES.....	12
2.3. COEFICIENTES DE SEGURIDAD	15
2.4. CRITERIOS PARA REFUERZOS A FLEXION.....	17
2.5. CRITERIOS PARA REFUERZOS A COMPresion.....	21
2.6. CRITERIOS PARA REFUERZOS A CORTANTE	23
2.7. OTROS ASPECTOS: ANCLAJE, DURABILIDAD E INCENDIO	25
2.8. ERRORES HABITUALES DE CONCEPCION Y DISEÑO	28
3. ENSAYOS Y CONTROL DE CALIDAD	29
3.1. INTRODUCCIÓN	29
3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CONSTITUYENTES	30
3.3. CARACTERIZACIÓN DEL LAMINADO	32
3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	37
3.5. CONCLUSIONES.....	43
3.6. BIBLIOGRAFÍA	43
4. PUESTA EN OBRA.....	44
4.1. INTRODUCCIÓN	44
4.2. SISTEMA DE LAMINADOS A BASE DE FIBRAS DE CARBONO.....	45
4.3. SISTEMA DE TEJIDOS A BASE DE FIBRAS DE CARBONO.....	49

1. APLICACIONES DEL PRODUCTO, COSTE E IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO

1.1. BREVE HISTORIA

Los “composites” o materiales compuestos deben su nombre a que están formados por dos componentes, una matriz y unas fibras, que actúan de una manera conjunta y solidaria. Se consiguen, de esta manera, unas prestaciones óptimas, en cuanto a comportamiento mecánico, principalmente.

Los materiales compuestos se han venido utilizando, desde hace más de 30 años, principalmente en la industria aeronáutica. Posteriormente su campo de aplicación se ha ido extendiendo: náutica, mundo del automóvil, telecomunicaciones,...

A mediados de los 80, en el EMPA (Laboratorio Suizo de Materiales) en Zürich, de la mano del profesor Urs Maier, se empezaron a hacer pruebas para la utilización de los materiales compuestos como refuerzo exterior de elementos de hormigón armado. Hasta ese momento se había venido usando el método L'Hermite de chapas de acero pegadas con resina epoxi. La intención de las investigaciones era sustituir la chapa por los materiales compuestos, con sus mejores prestaciones mecánicas.

Entre los distintos tipos de fibras (carbono, vidrio, aramida) que podían servir para este uso, se decidió utilizar las de carbono. Son las que tienen un módulo de elasticidad más alto, compatible con la deformación del hormigón armado. Tanto las fibras de vidrio como las de aramida, aún siendo sustancialmente más baratas, dan unas propiedades muy inferiores.

En cuanto a las matrices, la más compatible con las fibras de carbono ha demostrado ser la resina epoxi. Es la que mejor moja las fibras y la que más adherencia tiene a ellas. Además tiene un curado sin retracción, lo cual es importante para el uso al que va destinado.

En el EMPA, hasta 1.991, se realizaron ensayos para ver la factibilidad de la utilización de los laminados CFRP (polímeros reforzados con fibra de carbono). En 1.991 se ejecutó la primera obra real. Se reforzó el puente Ibach en Lucerna (Suiza). A lo largo de los siguientes años se siguieron realizando algunos refuerzos en diferentes estructuras, de una manera todavía experimental.

En 1.995 se empezó a utilizar este tipo de sistemas de una manera sistemática. Se comenzaron a comercializar los primeros sistemas de refuerzo por parte de distintas empresas, principalmente en Suiza y Alemania.

La primera obra en España con este tipo de sistemas fue en el Puente del Dragó en Barcelona. Consistió en el refuerzo de una serie de vigas del puente que habían sido dañadas. La obra se ejecutó en 1.996. Esta obra recibió el Premio Construmat al sistema más innovador durante la Feria Construmat de 1997.

A partir de entonces este tipo de sistemas de refuerzo se ha ido popularizando y haciendo práctica común en España, donde hay multitud de ejemplos de obras realizadas.

1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Los sistemas de refuerzo a base de “composites”, consisten, en esencia, en el pegado externo, sobre la superficie del hormigón, de unos materiales con unas prestaciones mecánicas, principalmente resistencia a tracción, sobresalientes. De esta forma, los materiales compuestos actúan como una armadura externa, que hace unas funciones muy similares a las que hace la armadura interna de acero.

Los principales sistemas de refuerzo con materiales compuestos son:

1.2.1. Refuerzo con materiales preconformados

El material compuesto viene en forma de laminados en los que ya van las fibras como elemento resistente y una matriz de resina. Normalmente tienen un espesor de entre 1,2 y 1,4 mm y una anchura entre 5 y 20 mm. Se presentan en rollos de longitud entre 100 y 500 ml que luego se cortan en obra a las dimensiones deseadas.

Como adhesivo para adherir los laminados al soporte se utiliza una resina epoxi. Normalmente debe ser un adhesivo de dos componentes de consistencia pastosa y alta tixotropía, para poderlo colocar en paredes o techos sin problemas de descuelgue o despegue del soporte.

Las características que debe tener el adhesivo que se utilice para este fin son:

- Buenas resistencias, principalmente a tracción y cizallamiento
- Temperatura de transmisión vítrea elevada.
- Buena adherencia al hormigón y a los laminados

1.2.2. Refuerzo con tejidos de fibras

Los tejidos a base de fibra de carbono o vidrio son materiales en los que no se ha colocado todavía la matriz de resina. Suelen tener entre el 95 y el 98% de las fibras en dirección longitudinal y entre el 2% y el 5% en la dirección transversal, para efectuar el cosido e impedir el deshilachado de los longitudinales.

Los tejidos suelen tener un espesor de entre 0,13 y 0,30 mm, con gramaje de entre 200 y 800 g/m³. Se suelen presentar con anchos de entre 30 y 60 cm, en rollos de entre 40 y 100 m, que posteriormente se cortan en obra a las dimensiones deseadas.

Para adherir los tejidos al soporte de hormigón se suelen utilizar resinas epoxi fluidas. Esa fluidez permite a la resina penetrar entre las fibras del tejido, impregnarlas, mojarlas y formar el material compuesto.

1.2.2.1. Refuerzo con bandas preconformadas dobladas en ángulo

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” para adaptarse a ángulos rectos. Esta forma es adecuada para hacer refuerzos a esfuerzo cortante. Estos laminados se presentan en piezas de longitudes adecuadas para adaptarse a las dimensiones más habituales 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.

1.3. CAMPO DE APLICACIÓN

Los campos de aplicación de los adhesivos descritos anteriormente son los siguientes:

1.3.1. Refuerzo a flexión

Para el refuerzo a flexión de vigas, viguetas, forjados y otros elementos de hormigón armado se utiliza, principalmente, el método de pegado de laminados rectos. En algún caso también se puede utilizar el método de pegado de los tejidos. En ambos casos consiste en adherir el refuerzo que actuará como armadura externa de tracción. El adhesivo servirá para transmitir el esfuerzo cortante entre el refuerzo y el hormigón.

Es de hacer notar que este tipo de refuerzo no se debe utilizar como armadura de compresión. El elemento de refuerzo es muy esbelto, por lo que la posibilidad de pandeo del mismo es muy grande. En ensayos realizados se ha visto que con irregularidades del soporte bastante pequeñas se puede producir este fenómeno de inestabilidad, llegando incluso a arrancar parte del soporte del hormigón.

1.3.2. 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. El sistema a utilizar es el de tejidos, debido a su fácil adaptabilidad a cualquier forma del soporte.

Con los tejidos se envuelve la pieza a reforzar completamente, de abajo a arriba. Se le pueden poner tantas capas de tejido como se desee. Esta envoltura provoca un confinamiento de la pieza que hace mejorar su comportamiento frente a cargas. Cuando la pieza se comprime, se acorta, y por efecto Poisson se dilata transversalmente. El efecto de confinamiento es controlar esta dilatación transversal, mejorando así la capacidad portante.

1.3.3. Refuerzo a cortante

Para el refuerzo de piezas a cortante lo que se hace es colocar las fibras de carbono a modo de estribos externos, adheridos por la resina epoxi. Para realizar este tipo de refuerzo se pueden utilizar tanto el sistema de tejidos como el de laminados preconformados en forma de "L". En ambos casos, se trata de envolver o cercar transversalmente el elemento a reforzar.

1.3.4. Refuerzo de muros

Otro tipo de refuerzo, quizá menos usual, es el de muros, tanto de fábrica de ladrillo como de hormigón. Estos muros pueden estar sometidos a esfuerzos longitudinales (cargas sísmicas, de viento...) como verticales (cargas gravitatorias). Con el sistema de pegado de tejidos, colocado en forma de cruz de San Andrés se logra mejorar la capacidad portante de los muros contra cualquiera de las cargas indicadas anteriormente.

1.4. COSTE DE LA SOLUCIÓN Y COMPARACIÓN CON OTROS SISTEMAS

El sistema más habitual que se ha venido utilizando para el refuerzo de elementos de hormigón es el pegado de chapas de acero por medio de resinas epoxi (método L'Hermite). Los sistemas de pegado de material compuesto son la solución alternativa y sustitutiva del anterior. Por este motivo se hace a continuación una comparación entre estos sistemas.

1.4.1. Coste del material

El acero es un material comparativamente barato. En cambio las fibras de carbono son un material caro. Se requiere gran cantidad de aportación de energía en su fabricación (como por ejemplo en el aluminio). Esto, unido a las economías de escala (son materiales todavía muy poco utilizados), hace que el coste del material sea grande. Se puede estimar que, para la misma capacidad resistente, las fibras de carbono son entre 6 y 10 veces más caras que el acero.

1.4.2. Coste de instalación

Las fibras de carbono son un material extraordinariamente ligero y fácil de manejar. Esto hace que su aplicación e instalación sea muy rápida y prácticamente sin ninguna necesidad de medios auxiliares. En un día se pueden colocar varios cientos de metros lineales de refuerzo, lo que hace que el coste unitario de la aplicación sea muy bajo.

En cambio, los elementos de acero son pesados y rígidos. Necesitan medios auxiliares y ser apretados hasta que endurezca la resina de adhesión. Por esto el coste de la ejecución de estos sistemas tradicionales es más alto.

Se puede estimar que el coste de aplicación de los sistemas con chapas pegadas es de 3 ó 4 veces superior al de los sistemas equivalentes con fibra de carbono.

1.4.3. Coste de mantenimiento

Las chapas de acero presentan el problema de la corrosión. Es necesario protegerlas y, probablemente, pintarlas varias veces a lo largo de su vida. Por el contrario, las fibras de carbono no presentan ese problema, por lo que el coste de mantenimiento es muy inferior.

1.4.4. Durabilidad

Debido a lo indicado anteriormente, la durabilidad esperable en los refuerzos realizados con sistemas a base de fibras de carbono es bastante superior a los realizados en acero. Las fibras de carbono, al no sufrir corrosión, no son afectadas ni por ambiente marino, húmedo o con agresión química. Salvo los impactos mecánicos o una radiación solar excesiva, hay pocas cosas que puedan deteriorar significativamente a los materiales compuestos de fibra de carbono.

1.4.5. Costes asociados

Cuando se realiza un refuerzo hay que pensar que suele ser de una instalación que ya está en funcionamiento: un puente sobre el que está pasando tráfico, una fábrica en funcionamiento, un edificio habitado,... Por eso hay que tener en cuenta que el efectuar el refuerzo conlleva unos costes asociados, aparte de los propios de la ejecución: cortar el tráfico, parar la fábrica, desalojar

o molestar a los habitantes del edificio. Estos costes, muchas veces (la mayor parte de la veces) son incluso mayores que los de la propia ejecución del refuerzo.

Los sistemas de refuerzo con fibras de carbono son mucho más fáciles y flexibles de instalar, más rápidos, con menos necesidad de medios auxiliares y con menores molestias generadas. Por esta razón, los costes asociados a un refuerzo con fibras de carbono son sensiblemente inferiores a los de cualquier método alternativo. Este suele ser el criterio, no pocas veces, de elección de la forma de reforzar, que le da una gran ventaja a los nuevos métodos que aquí se están presentando.

1.5. IMPLANTACIÓN EN EL MERCADO ESPAÑOL

Como ya se indicó anteriormente, la primera obra realizada en España con estos sistemas de refuerzo data de 1996. Pero es en 1997 cuando se empiezan a realizar obras de una manera sistemática. A continuación se da una estimación de la progresión de la utilización del sistema de laminados preconformados:

- Año 1.997: 800 ml
- Año 1.998: 1.500 ml
- Año 1.999: 6.500 ml
- Año 2.000: 17.000 ml
- Año 2.001: 29.000 ml
- Año 2.002: 40.000 ml
- Año 2.003: 60.000 ml

En las cifras anteriores se ve la rápida progresión que ha tenido este tipo de sistemas y la buena aceptación por parte de la industria de la construcción en España.

1.6. PROYECCIÓN FUTURA

Los campos en los que se están efectuando más investigaciones y en los que, probablemente, veamos avances en el futuro, son:

- Laminados pretensados. Se trata de optimizar la capacidad de los laminados, que no es totalmente utilizada con los refuerzos pasivos.
- Barras de fibra de carbono. Se trata de utilizar la fibra de carbono, en forma de barras insertadas en el seno del hormigón, y no pegadas externamente con una resina.
- Nuevas fibras. Se estén estudiando nuevas fibras sintéticas, a partir de las innumerables posibilidades que nos da la ciencia de los polímeros y plásticos.
- Materiales compuestos híbridos. Consiste en la posibilidad de utilizar “composites” con una mezcla de fibras de carbono y de vidrio. De esa forma se puede optimizar la relación prestaciones-precio.
- Nuevos métodos de anclaje. Uno de los problemas de este tipo de refuerzos es el comportamiento de anclaje en las puntas, principalmente con hormigones de baja resistencia. El desarrollo de métodos de anclaje para este tipo de situaciones en una de las cuestiones que todavía no está totalmente resuelta.
- Mejora de los adhesivos. Los adhesivos de resina epoxi funcionan perfectamente si son aplicados dentro de unas condiciones determinadas. Con los nuevos adhesivos que se están desarrollando se pretende hacerles más versátiles en cuanto a las condiciones de aplicación (temperatura, humedad ambiental y del soporte, velocidad de endurecimiento,...).

2. CRITERIOS GENERALES DE DISEÑO

2.1. NORMATIVA VIGENTE, PRESENTE Y FUTURA

La tecnología de refuerzos estructurales utilizando materiales elaborados con fibra de carbono es relativamente nueva dentro del mundo de la construcción si hacemos la comparación con otros tipos de materiales utilizados en los refuerzos como son el acero, ya sea empleado en forma de platabandas encoladas, armaduras colocadas a posteriori o perfiles añadidos.

Dentro del campo de la reparación y refuerzo de estructuras, los técnicos proyectistas se han tenido que enfrentar a problemas estructurales que requerían soluciones no amparadas de manera implícita por ninguna normativa, este es el caso del cálculo de refuerzos con platabandas encoladas con resina epoxi. Este tipo de refuerzos se vienen calculando y realizando desde hace más de 30 años basándose en los ensayos realizados en diferentes centros de investigación, tesis doctorales y la experiencia acumulada por las realizaciones.

Dentro de la actual normativa española de cálculo “EHE. Instrucción de Hormigón Estructural” no se habla en ningún momento de la tecnología de refuerzos de elementos de hormigón, pero deja un margen al técnico para tomar decisiones basadas en los principios fundamentales del cálculo de estructuras. El buen criterio del proyectista de refuerzos juega un papel fundamental a la hora de esta de decisiones en la elección de los modelos de cálculo que estima más adecuados para la realización del dimensionamiento de los refuerzos.

Las normativas actuales que pueden ser aplicadas son:

2.1.1. Normativas generales

- CODIGO MODELO. CEB-FIP 1990 para hormigón estructural
- ACI 318-99. Building Code Requirements for Structural Concrete

2.1.2. Normativas particulares

- ACI 440R-96. State-of-the-Art Report on Fiber-Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE) 1997 “Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforced Materials,” Concrete Engineering Series 23, ed. by A. Machida, Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, Japan.
- CAN/CSA-S806-02, “Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers”, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, (May 2002).
- FIP Task Group 9.3 “FRP Reinforcement for Concrete Structures” (1999)

2.2. CARACTERÍSTICAS MECANICAS DE LOS MATERIALES

Los sistemas de refuerzos mediante el empleo de fibras de carbono se basan fundamentalmente en su adhesión externa, mediante el empleo de resinas especiales de matriz epoxi. Actualmente conviven en el mercado dos sistemas diferentes:

- **Laminados de fibra de carbono**
- **Hoja tejido de fibra de carbono**

Por otro lado estos pueden estar fabricados en diferente clase de material que tienen como parámetro básico de comparación su diferente **módulo de elasticidad**, así diferenciamos:

- **Fibras de bajo módulo de elasticidad**, con un módulo en el entorno de $2,3 \times 10^5$ N/mm² y un alargamiento en rotura aproximado de un 15%
- **Fibras de alto módulo de elasticidad**, con un módulo de elasticidad que va entre 4,4 y $6,4 \times 10^5$ N/mm² y un alargamiento en rotura de entre un 4 y un 6%.

2.2.1. HOJAS DE FIBRA DE CARBONO.

Se trata de una lámina flexible y adaptable a cualquier superficie compuesta por filamentos de fibra de carbono orientados en una sola dirección. Las hojas cuentan con una elevada relación resistencia/peso y rigidez/peso. Las fibras de carbono se fabrican mediante la pirólisis de fibras precursoras de base poliacrilonitrílica a una temperatura aproximada de 1500°C. Como resultado de la pirólisis se obtiene una cadena de fibras de carbono de alineación elevada. Los filamentos de fibra de carbono se ensamblan formando hebras sin torcer, usadas para crear una lámina unidireccional. Después de alineadas y estiradas, las fibras se entrelazan en simultáneo con una tela de fibras de vidrio generándose el tejido definitivo. Las características generales de este tipo de material son las que a continuación se detallan.

	HOJAS DE FIBRA DE CARBONO	
	BAJO MODULO	ALTO MODULO
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	230.000	440.000
Resistencia a tracción (N/mm ²)	3.400	2.400
Deformación de Rotura (‰)	15	5.5
Espesor (mm)	0.11 -0.16	0.16
Peso (g/m ²)	200-300	300

2.2.2. LAMINADO DE FIBRA DE CARBONO

El sistema está compuesto por un composite de matriz polimérica de resina epoxi reforzada con fibras de carbono. Las fibras de carbono se fabrican a partir de un copolímero de poliacrilonitrilo (PAN). El filamento de PAN es sometido a una serie de tratamientos a altas temperaturas, hasta 2000-2500°C, en el que se eliminan muchos elementos distintos del carbono y se favorece la

aparición de cristales de carbono orientados según el eje. Las características generales de este tipo de material son las que a continuación se detallan.

LAMINADO FIBRA DE CARBONO	
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	165.000
Resistencia a tracción (N/mm ²)	2.800
Deformación de rotura (‰)	17
Contenido volumétrico en fibra (%)	>68
Espesor (mm)	1.2

2.2.3. CAMPOS DE UTILIZACION

Los refuerzos más habituales son sobre vigas, puentes, losas, pilares, muros, depósitos, silos chimeneas, tuberías, etc. En cuanto a los esfuerzos, la naturaleza y rigidez del material laminado hace que éste se aplicable solo para refuerzos sobre superficies planas traccionadas de elementos sometidos a flexión. La hoja de fibra de carbono, gracias a su flexibilidad y adaptabilidad a cualquier superficie puede se empleada para el refuerzo de elementos sometidos a esfuerzos de tracción, de cortante o de compresión por efecto de confinamiento. Estos aspectos quedan resumidos en la siguiente tabla:

TIPO DE ESFUERZO	LAMINADO	HOJA
FLEXION	X	X
CORTANTE		X
CONFINAMIENTO		X

2.2.4. RESINAS EPOXI

Parte fundamental de estos sistemas de refuerzo lo constituyen las resinas que garantizan la adhesión de estos refuerzos al soporte. Estas resinas de base epoxi cumplen principalmente las siguientes misiones:

2.2.4.1. Resinas para imprimación de soportes

Resinas de base epoxi y baja viscosidad diseñadas para cerrar los poros superficiales del hormigón. Una vez preparada la superficie del hormigón se procede a aplicar el imprimador que penetrando en el hormigón mejora las características resistentes superficiales de éste a la vez que incrementa la adhesión con la hoja de fibra de carbono.

El tapaporos de imprimación se presenta en forma de dos componentes (componente activo y endurecedor) envasados separadamente que deben mezclarse en el momento de su aplicación. La mezcla de los mismos debe hacerse en la proporción indicada y en la cantidad necesaria para la aplicación que se vaya a realizar, teniendo en cuenta el tiempo de vida en el recipiente (pot-life) y el tiempo abierto de aplicación de la mezcla una vez realizada.

Existen diferentes versiones de imprimador en función de la temperatura ambiente, según esté comprendida entre 15° y 35°C (resinas de verano) ó entre 5° y 15°C (resinas de invierno).

2.2.4.2. Masillas de Nivelación

Estas masillas están especialmente diseñadas para relleno de cavidades, coqueas e irregularidades superficiales menores de 0,5 cm. Posee una elevada adhesión al hormigón, buena resistencia a compresión y un tiempo de vida en recipiente (pot-life) y tiempo abierto de utilización adecuados para la aplicación que se va a realizar con ella.

Existen diferentes versiones de masillas en función de la temperatura ambiente, según esté comprendida entre 15° y 35°C (resinas de verano) ó entre 5° y 15°C (resinas de invierno).

2.2.4.3. Adhesivo o resina.

Este es el material que va a actuar de puente de transmisión de cargas entre las láminas de fibras de carbono y el hormigón, por consiguiente sus características mecánicas y reológicas son de suma importancia para la mayor eficacia del refuerzo. La misión de la capa de adhesivo o resina es pegar la lámina de refuerzo a la superficie del hormigón y, al mismo tiempo, crear un compuesto de elevadas características mecánicas capaz de transmitir los esfuerzos desde el hormigón a la lámina de fibra de carbono, por consiguiente tiene que poseer una adhesión al hormigón y a la lámina muy buena, además de características mecánicas y reológicas adecuadas.

Existen diferentes versiones de resinas en función de la temperatura ambiente, según esté comprendida entre 15° y 35°C (resinas de verano) ó entre 5° y 15°C (resinas de invierno).

2.3. COEFICIENTES DE SEGURIDAD

2.3.1. COEFICIENTES DE SEGURIDAD SOBRE LAS ACCIONES.

Las consideraciones relativas a las diferentes acciones se regirán por lo indicado en la EHE

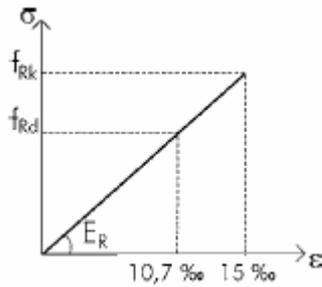
TIPO DE ACCION	Nivel de control de ejecución	
	NORMAL	INTENSO
Permanente	1.50	1.35
Variable	1.60	1.50

2.3.2. COEFICIENTES DE SEGURIDAD SOBRE LOS MATERIALES.

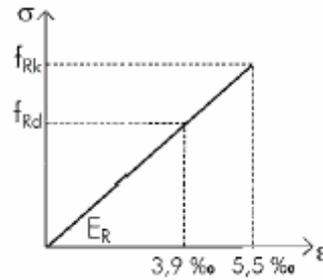
Las consideraciones relativas a los diferentes materiales respecto a los coeficientes de minoración de resistencia se regirán por lo indicado en la EHE

MATERIAL	γ
Hormigón	1.5
Acero	1.15

Por otro lado, las fibras de carbono tienen un comportamiento prácticamente elástico, sin reserva plástica alguna (son totalmente frágiles) siendo capaces de recuperar el 100% de las deformaciones sufridas. Esto obliga a guardar una reserva de deformación elástica que no se tiene en cuenta en el cálculo tal y como muestran las siguientes figuras:



Fibras de Bajo Módulo



Fibras de Alto Modulo

El coeficiente de minoración de resistencia del material para la hoja de fibra de carbono es en este caso:

$$\gamma = 1,4$$

En el caso de los refuerzos ejecutados con laminados de fibra de carbono las resistencias a tracción de diseño recomendadas están en el entorno de los 900 N/mm². Esto representa:

$$f_{Rd} = 900 \text{ N/mm}^2 \quad f_{Rk} = 2.800 \text{ N/mm}^2 \quad f_{Rd} = \frac{f_{Rk}}{\gamma_R} \quad \gamma = 3.1$$

2.4. CRITERIOS PARA REFUERZOS A FLEXION

2.4.1. GENERALIDADES

Para la comprobación de los E.L.U. y E.L.S. se utilizarán los criterios establecidos por la normativa EHE en tanto sean aplicables. Es decir que la existencia de un nuevo material de refuerzo, se acomodará a las exigencias establecidas para el acero y el hormigón en las distintas comprobaciones de tal forma que se cumplan las hipótesis básicas de los métodos adoptados en lo relativo al equilibrio y a la compatibilidad de deformaciones.

2.4.2. ESTADO LÍMITE ÚLTIMO

El Estado Límite Último de flexión de una sección reforzada con fibra de carbono tiene unas consideraciones teóricas muy similares al caso de una sección de hormigón estructural.

La única diferencia es la existencia de un nuevo material que está siempre situado en el paramento de la sección sometido a tracción.

La teoría general de flexión que desarrolla la EHE, utiliza el diagrama de pivotes. Ampliando dicho diagrama a las secciones reforzadas con fibra de carbono, se obtiene un nuevo pivote al que denominaremos R, por ser del material de "R"efuerzo, frente a los tradicionales A, B y C.

El pivote R corresponde a la deformación máxima de cálculo del material de refuerzo $\epsilon_{R,d}$.

La deformación máxima garantizada por los fabricantes del material, que se considera como deformación máxima característica $\epsilon_{R,k}$, se debe dividir por el coeficiente de seguridad del material, es decir:

$$\epsilon_{R,d} = \frac{\epsilon_{R,k}}{\gamma_R} \quad [1]$$

Además, hay que tener en cuenta que la deformación máxima del material de refuerzo debe limitarse para prevenir el posible desprendimiento de dicho material o la posible rotura del recubrimiento de la sección.

El diagrama de pivotes que se considera es:

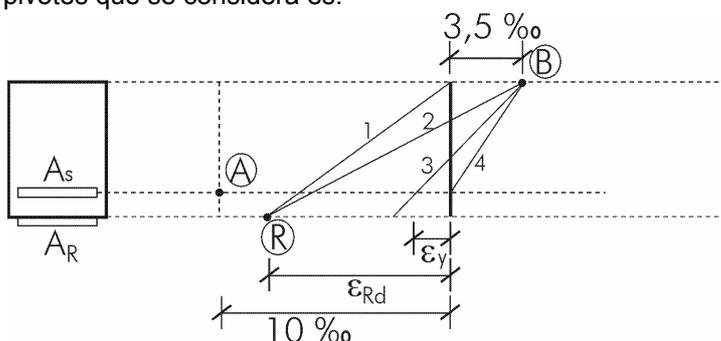


Diagrama de pivotes para secciones con refuerzo

En flexión simple, en hormigón armado, los pivotes son A y B y, en secciones reforzadas, los pivotes serán R y B.

2.4.2.1. Dominios de deformación

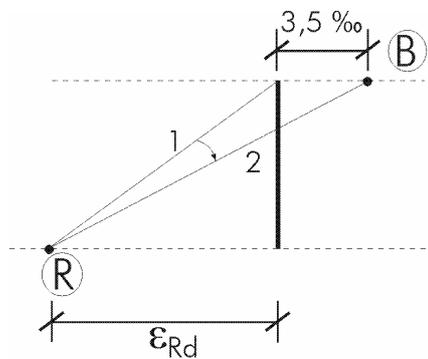
Los dominios de deformación de una sección reforzada sometidos a flexión simple son dos, el dominio de los planos que pivotan en R y el de los planos que pivotan en B.

▪ **Dominio de los planos que pivotan en R**

Este dominio está limitado por los *planos 1 y 2*.

Todos los planos de este dominio pasan por el pivote R, es decir que las secciones que rompen por planos que pertenecen a este dominio rompen por el refuerzo

Si el dimensionamiento permite utilizar esta forma de rotura, es muy rentable disponer refuerzo puesto que éste se dispone trabajando a su máxima capacidad.



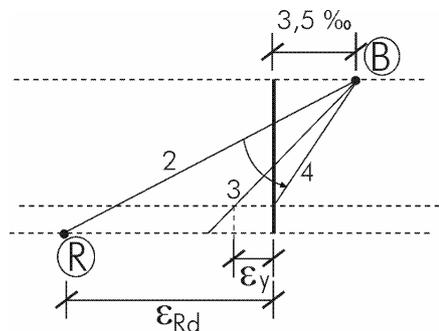
Dominio de los planos que pivotan en R

▪ **Dominio de los planos que pivotan en B**

Este dominio está limitado por los *planos 2 y 4*.

Todos los planos de este dominio pasan por el pivote B, es decir que las secciones que rompen por planos que pertenecen a este dominio rompen por compresión del hormigón.

En estos planos de deformación, el refuerzo ya no tiene efectividad máxima aunque el refuerzo sigue siendo rentable.



Dominio de los planos que pivotan en B

Dentro de los posibles planos de deformación que pasan por B hay dos dominios con un comportamiento marcadamente diferente.

1. *El dominio entre los planos 2 y 3*

En este dominio, el acero dispuesto en la sección trabaja a su máxima capacidad y, aunque se pierde efectividad respecto al dominio anterior, sigue siendo rentable disponer refuerzo.

2. *El dominio entre los planos 3 y 4*

En este dominio ya el acero de la sección disminuye su colaboración porque la deformación del acero es menor que su deformación de plastificación. En este dominio no es rentable disponer refuerzo salvo que el incremento resistente necesario del elemento estructural sea muy pequeño. Este dominio, tampoco se utiliza para dimensionar el hormigón armado a flexión.

Así pues, en un problema general de refuerzo a flexión es conveniente saber, antes de disponerse a calcular, en cual de los dominios antes descritos se encuentra el plano de rotura de la sección reforzada.

2.4.2.2. Momento R_B y Momento Límite

En primer lugar se definen:

- Momento último de la sección sin reforzar: M_O
- Momento que es necesario resistir: M_R

Evidentemente, siempre ocurrirá que $M_R > M_O$ porque, en caso contrario, no habrá que reforzar.

Por otro lado, para una sección dada, cada uno de los planos de deformación que delimitan dominios están asociados a un momento flector.

Estos momentos que se pueden llamar momentos de referencia o momentos de comparación son, en concreto, los siguientes:

- *Momento R_{RB}* : Es el momento flector que delimita el paso del pivote R al pivote B, es decir, el momento correspondiente al plano 2.
 M_{RB} se obtiene, sencillamente, aplicando las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos.
- *Momento límite*: Es el momento correspondiente al plano 3 por encima del cual el acero de la sección existente deja de trabajar a su máxima capacidad.
 M_{LIM} se obtiene, también sencillamente, aplicando las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y momentos.

Para tener una visión gráfica de la importancia de estos momentos de referencia, obsérvese el gráfico siguiente:

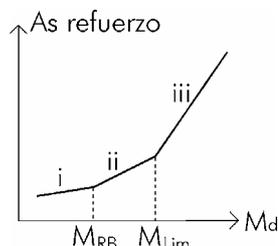


Gráfico momento-área de refuerzo

- La *zona i* tiene una pendiente prácticamente constante y esto es debido a que la tensión del acero y del refuerzo se mantienen en sus valores máximos (f_y , f_R). Esta zona es la que corresponde al dominio de planos de deformación entre los planos 1 y 2, gobernada por el pivote R.
- En la *zona ii* aumenta la pendiente progresivamente de forma lenta hasta el M_{LIM} . Esto es debido a que, si bien la tensión del acero se mantiene en su límite máximo f_{yd} , la tensión del refuerzo disminuye progresivamente. Esta zona es la gobernada por el pivote B y corresponde a la zona entre los planos 2 y 3.
- En la *zona iii* el aumento de la pendiente es mucho mayor ya que tanto la tensión del refuerzo como la de la armadura son menores que sus máximos y además van decreciendo conforme se aumente el momento. Esto ocurre cuando el momento es mayor que M_{LIM} , y el plano de deformación está entre los planos 3 y 4.

Se observa, pues, que situar el momento que es necesario resistir, M_R , respecto al M_{RB} y al M_{LIM} es muy importante en el estudio de la rentabilidad del refuerzo.

Cuando M_R está por debajo del M_{RB} , es muy rentable reforzar y se podrán absorber incrementos importantes.

En cambio, si el momento M_R está por encima del M_{LIM} , no es rentable reforzar porque para un pequeño incremento de momento, la necesidad de cm^2 de refuerzo es muy grande.

No se pueden dar valores concretos respecto a los porcentajes de incremento de momento que son posibles asumir con refuerzo porque estos dependen mucho de la sección a reforzar y del momento resistente de la sección sin refuerzo M_O .

2.5. CRITERIOS PARA REFUERZOS A COMPRESION

La fibra de refuerzo tiene una importante resistencia a tracción pero nula capacidad de absorber compresiones, debido a su elevadísima esbeltez. Ni siquiera puede confiarse en ella para contribuir a la compresión cuando está adherida a un elemento comprimido, precisamente porque no se puede asegurar que ésta no se va a despegar. Sin embargo, en pilares se pueden utilizar las fibras en dirección perpendicular al esfuerzo de compresión zunchando el elemento.

El zunchado transversal del elemento consigue minimizar la deformación transversal por efecto Poisson del hormigón con lo que se mejora la resistencia del hormigón del elemento y en consecuencia, se aumenta la capacidad del soporte. Este efecto se denomina confinamiento. El confinamiento aumenta dos características del hormigón muy importantes: la resistencia a compresión, la deformación de rotura; y ninguna otra.

El efecto del confinamiento tiene un sencillo tratamiento desde el punto de vista cualitativo. Es decir, es fácil explicar cómo funciona. Sin embargo, tiene una compleja implementación numérica.

2.5.1. DESCRIPCION DEL EFECTO DE CONFINAMIENTO

Sea una sección circular, por ejemplo, sometida a una fuerza P y, por lo tanto, a una tensión longitudinal. Si la sección está sin confinar transversalmente, ésta tendrá una deformación transversal dada por la relación entre ambas existente a través del coeficiente de Poisson. Dicha tensión transversal aparecerá cuando se coarte esta deformación a través de un elemento de zunchado, bien sean los propios cercos del pilar o un material de refuerzo exterior, que comprime el hormigón de la sección perpendicularmente al esfuerzo longitudinal.

La tensión producida por el material de zunchado será tanto mayor cuanto más rígido sea el material y, también, es proporcional a la deformación transversal de este. Es decir a mayor deformación transversal, mayor tensión de zunchado.

Asegurando el equilibrio del material de zunchado, considerando su comportamiento elástico y garantizando la compatibilidad de la deformación transversal del hormigón con la deformación del refuerzo de fibra de carbono se obtiene una tensión de confinamiento de la que depende el incremento de la resistencia y la deformación última del hormigón confinado.

Por lo tanto, la mejora de resistencia del hormigón depende de la deformación del material de refuerzo, la cual a su vez depende de la capacidad de deformación transversal de la sección, la cual depende, a su vez, del grado de confinamiento. Esta dependencia circular es solucionable mediante un proceso iterativo que convergerá hacia la solución.

El fenómeno del confinamiento se puede abordar numéricamente mediante las expresiones del MC-90 (Art 3.5) que son similares a las expresadas en la EHE.

2.5.2. INFLUENCIA DE LA FORMA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL CONFINADA

La forma de la sección transversal confinada es determinante en la efectividad del refuerzo a efectos de confinamiento de la sección. Atendiendo a la sección transversal, la efectividad del refuerzo depende, fundamentalmente, del cambio de dirección del refuerzo. Es decir, en el caso de una sección circular, el cambio de dirección del refuerzo es constante a lo largo de todo el perímetro, por ello, la efectividad del refuerzo es máxima.

En el caso de una sección cuadrada, la efectividad del refuerzo es debida al cambio de dirección que se produce, exclusivamente, en las esquinas. Por esta razón se ve disminuida la capacidad de confinamiento. Esta disminución se hace aún más patente cuando, en lugar de una sección cuadrada, se tiene una sección rectangular.

2.6. CRITERIOS PARA REFUERZOS A CORTANTE

Se ha demostrado que la resistencia al esfuerzo cortante de una viga aumenta si esta se envuelve parcial o totalmente con fibra de carbono. El aumento de resistencia dependerá de varios factores, entre los cuales se incluyen la configuración de la envoltura, la cantidad y el tipo de fibra, la resistencia del hormigón original, y la naturaleza de las cargas y las condiciones del soporte

El E.L.U. frente a cortante de un elemento de hormigón estructural se garantiza comprobando que:

$$V_d \leq V_{u1}$$

$$V_d \leq V_{u2} = V_{cu} + V_{su} + V_{ru}$$

donde:

V_d = Esfuerzo cortante de cálculo

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

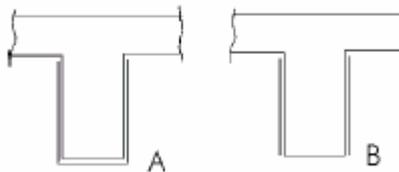
V_{u2} = Esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma

V_{cu} = Contribución del hormigón a la resistencia a esfuerzo cortante

V_{su} = Contribución de la armadura transversal del alma a la resistencia a cortante

V_{ru} = Contribución del refuerzo con fibra de carbono a la resistencia a cortante.

La contribución del refuerzo del alma mediante refuerzos con fibra de carbono tiene una formulación similar a la del acero convencional de los estribos. Se envuelven las fibras transversalmente alrededor de una sección de hormigón. El método más eficaz para el refuerzo a cortante es envolver toda la viga con fibra de carbono. Habitualmente esta disposición no es fácilmente ejecutable en la práctica debido a la presencia de losas u otros elementos soportados. El método más común es envolver los lados y la parte inferior de la sección en forma de "U" (fig.A). También es posible reforzar colocando el refuerzo a ambos lados de la viga, aunque la eficacia de esta disposición está limitada por el deficiente anclaje de la hoja de fibra de carbono (fig. B).



La orientación de la fibra por otro lado puede optimizar el refuerzo utilizando una disposición a 45°, aunque requiere especial atención a su correcta orientación y una mayor dificultad de colocación y longitud de envoltura.

La tensión del material de refuerzo debe limitarse a un valor que corresponde al obtenido de su ecuación constitutiva para un valor de la deformación que cumpla la compatibilidad. Este requisito garantizará un control adecuado del estado tensional de la armadura en servicio y, consecuentemente, de la fisuración correspondiente. A falta de pormenorizados estudios de dicha

compatibilidad se debe suponer una deformación no mayor del 2‰, según marca la EHE en su Art. 40.2.

La deformación efectiva de la fibra de carbono en un refuerzo a cortante será, en muchos casos, mayor de este 2‰. Por ello, la limitación de la EHE (2‰) será la que debe ser introducida en el cálculo. Sin embargo, existen casos en los que esta deformación efectiva puede ser menor por lo que la tensión de cálculo debe calcularse con dicha deformación. Este caso puede ser habitual cuando los elementos a reforzar tienen un canto pequeño, cuando la resistencia del hormigón a reforzar es baja o cuando se disponen refuerzos tan solo sobre los lados de la viga (fig B).

2.7. OTROS ASPECTOS: ANCLAJE, DURABILIDAD E INCENDIO

2.7.1. ANCLAJE

El anclaje del material de refuerzo a la estructura existente debe garantizarse mediante una adecuada longitud de anclaje y mediante un adecuado tratamiento de la superficie de contacto. El cumplimiento de las prescripciones de este apartado es fundamental para garantizar un adecuado comportamiento del refuerzo.

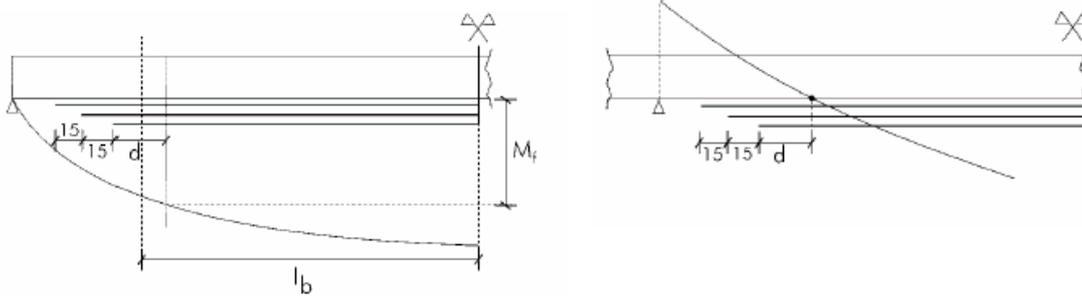
Debe garantizarse:

- Una resistencia característica del hormigón mayor de 17 N/mm².
- Una abertura de fisura menor de 0,25 mm. En caso de existir fisuras mayores, éstas deben ser inyectadas.
- La superficie del hormigón de contacto debe estar limpia, sin grasa, sin restos de productos de curado, ni polvo.
- El material de refuerzo no debe envolver esquinas perpendiculares a la dirección de la fibra.
- El radio mínimo de los chaflanes debe ser 30 mm.
- No se deben envolver superficies cóncavas

Una adecuada longitud de anclaje evita la rotura de la adherencia o la posible rotura del recubrimiento del hormigón. La rotura de la adherencia del material de refuerzo con el hormigón se produce por una deficiente superficie de contacto para anclar la fuerza que desarrolla el material de refuerzo. Normalmente, la rotura de la adherencia del material de refuerzo no se produce en la interfase hormigón-refuerzo, sino que se produce por desprendimiento del hormigón de recubrimiento. La longitud de contacto se calcula, por tanto igualando la capacidad del material de refuerzo a la capacidad a tracción del hormigón. Dado que el mecanismo de fallo es frágil, es recomendable aplicar un coeficiente de seguridad igual a 2,0.

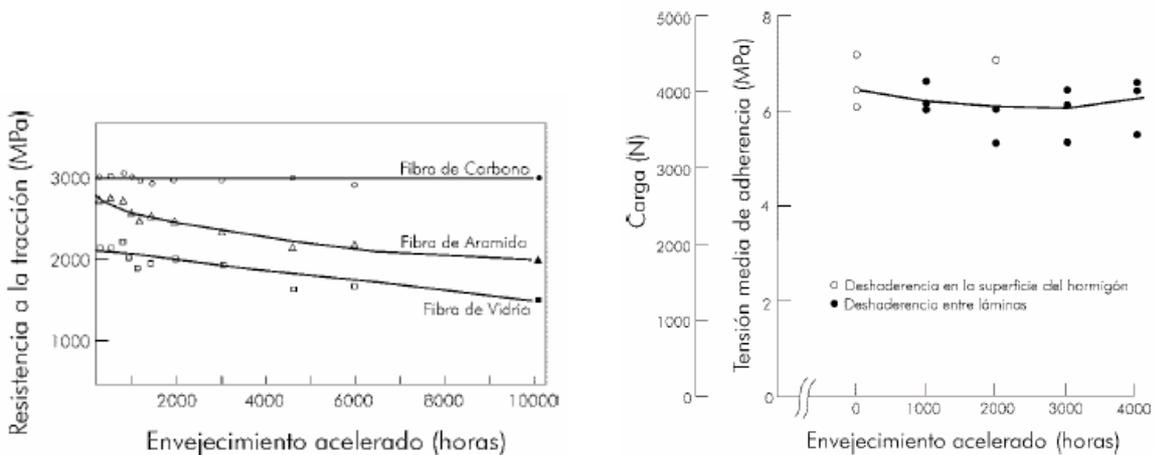
Se deben tomar, además, las siguientes precauciones:

- En vigas simplemente apoyadas, a partir del punto donde el momento flector de cálculo es menor que el momento de fisuración, se prolonga la fibra una longitud de 15 cm ó d (el mayor de ellos).
- En vigas continuas, a partir del punto donde el momento flector de cálculo es nulo, se prolonga la fibra una longitud de 15 cm ó d (el mayor de ellos).
- Si se disponen varias capas de fibra, el punto final de cada capa debe separarse 15 cm entre capas.
- Todas estas longitudes deben ser mayores que la que resulta de aplicar la distancia l_b a partir del punto de esfuerzo máximo.



2.7.2. DURABILIDAD

La ejecución de refuerzos mediante el empleo de fibras de carbono, se lleva poniendo en práctica con gran éxito desde hace más de 25 años. El empleo comercial de estos sistemas de refuerzo estructura basados en el empleo de hojas de fibra de carbono, fue desarrollado tras años de investigaciones, en Japón en 1984, no habiéndose producido ningún fallo de estos sistemas producidos por su falta de durabilidad. Por otro lado existen gran cantidad de estudios basados en ensayos de envejecimiento acelerado equivalentes a más de 50 años de exposición natural que avalan una contrastada durabilidad de estos sistemas



2.7.3. FUEGO

Las fibras de carbono tienen alta resistencia al calor, no así las resinas de base epoxi que constituyen parte fundamental de este tipo de sistemas de refuerzo. El punto de transición vítrea de estas resinas esta en el entono de los 50°C, temperatura que es rápidamente alcanzable en un incendio tipo.

Sin embargo, si se mantiene un criterio de cálculo, de general aceptación y aplicación en refuerzos estructurales, por el que se debe satisfacer que el valor de cálculo de la respuesta estructural del elemento sin reforzar sea mayor que el valor característico del efecto de las acciones, es decir, que la estructura sin reforzar tenga al menos un coeficiente de seguridad mayor o igual que 1, se

garantizará que, en servicio, si el material de refuerzo falla la estructura no colapsará, estando entonces el tiempo de resistencia al fuego condicionado por la resistencia al fuego del elemento de hormigón.

Si en cambio el coeficiente de seguridad residual es menor que 1, deberá proyectarse, en cada caso, una protección contra fuego suficiente como para asegurar que durante el tiempo deseado las resinas epoxi no alcancen su temperatura de transición vítrea.

2.8. ERRORES HABITUALES DE CONCEPCION Y DISEÑO

Para el desarrollo de las diferentes teorías utilizadas se han tenido en cuenta una serie de consideraciones que forman parte fundamental de los principios básicos de diseño que se deben garantizarse no solo en la fase de proyecto sino también en el proceso de ejecución material de estos refuerzos.

Una de las hipótesis fundamentales que ha de cumplirse en este tipo de refuerzos, es la **compatibilidad de deformaciones**. Para cumplir esta hipótesis es preciso, por ejemplo en flexión, para refuerzos con hojas de fibra de carbono, limitar cuando el número de capas es grande, la deformación máxima compatible con el material existente. Esta limitación disminuye, evidentemente, la capacidad de refuerzo del material.

Otros métodos de refuerzo (por ejemplo, con chapas de acero) extraen del material aportado toda su capacidad resistente. Es conveniente recordar que, para poder utilizarla, hace falta demostrar la compatibilidad de deformaciones entre chapa y el material existente. En el caso concreto de refuerzos con chapas, es imprescindible demostrar que el material de la interfase transmite el rasante con la adecuada resistencia y rigidez. En caso de no poder garantizarse dicha compatibilidad, los tradicionales métodos de cálculo de secciones no son aplicables.

Otro ejemplo de que las consideraciones de compatibilidad limitan la capacidad resistente del material de refuerzo se da en el refuerzo por confinamiento. Para garantizar el cálculo correcto del material de refuerzo es preciso **imponer la igualdad de la deformación transversal de la sección zunchada con la deformación longitudinal del material**. A la vista de los diferentes estudios realizados se observa que en poquísimas ocasiones es posible alcanzar en el material de refuerzo su deformación máxima. Por ello, la tensión del material a introducir en las fórmulas de confinamiento no puede ser la máxima del material en cada caso concreto, la deformación máxima deberá calcularse específicamente mediante un proceso iterativo. La consideración de que el material trabaja a su límite está del lado de la inseguridad. Disponer un coeficiente de seguridad a esta deformación tampoco parece el método más adecuado.

La misma consideración puede hacerse respecto a la tensión del material a utilizar en los refuerzos a cortante. En este tipo de refuerzos se podrá considerar una deformación del 2‰ solo cuando se den una serie de condiciones ya especificadas. En otro caso, habrán de realizarse estudios específicos puesto que la deformación del material será, sin duda, menor. En ningún caso el refuerzo a cortante debe trabajar a una deformación superior al 2‰, según se prescribe en la EHE. Dicha consideración limita, en gran medida la efectividad del refuerzo frente a esfuerzo cortante.

3. ENSAYOS Y CONTROL DE CALIDAD

3.1. INTRODUCCIÓN

El cálculo y diseño de estructuras con materiales compuestos requiere disponer de datos experimentales fiables. En los casos de cálculo y análisis, la caracterización experimental se puede hacer a varias escalas: micromecánica, macromecánica, o estructural. El ensayo de los materiales compuestos tiene tres objetivos principales: determinación de las propiedades básicas de la lámina unidireccional para su uso como datos de entrada en el cálculo y diseño estructural; investigación y verificación de modelos mecánicos de comportamiento; y estudios experimentales del comportamiento del material y de estructuras con geometrías específicas y bajo condiciones de carga determinadas. Bajo estos tres objetivos generales, podemos nombrar tipos específicos de ensayos y aplicaciones concretas de dichos ensayos:

1. Caracterización de los materiales constituyentes: fibras, matrices e interfase entre ambas, para su uso en un análisis micromecánico. Conociendo de antemano estas propiedades uno puede predecir, en principio, el comportamiento de la lámina individual y a continuación el de laminados y estructuras.
2. Caracterización de las propiedades de la lámina unidireccional simple que forma la unidad básica de construcción de laminados de material compuesto.
3. Determinación de las propiedades interlaminares, es decir, de la interacción entre láminas de material compuesto.
4. Comportamiento del material bajo condiciones especiales de carga, por ejemplo, fatiga multiaxial, deformaciones diferidas en el tiempo o impacto.
5. Análisis experimental del estado tensional y resistencia de estructuras y sistemas de materiales compuestos, especialmente aquellos que presentan discontinuidades geométricas, como bordes libres, agujeros, uniones, o transiciones súbitas.
6. Evaluación de la integridad estructural por medio de ensayos no destructivos.

En el caso de refuerzo y reparación de estructuras de hormigón armado, fábrica de ladrillo y madera, este esquema es igualmente válido. Los componentes a ensayar más habituales son la fibra de carbono y la resina epoxi que cumple la función tanto de matriz de la lámina de carbono como de adhesivo entre el laminado y el sustrato. La caracterización de láminas generalmente se limita a ensayar las propiedades elásticas en la dirección de la fibra de láminas unidireccionales, pero el conocer otras propiedades como el comportamiento ante tensiones de cortadura amplía nuestra capacidad de diseño. Por último, el ensayo de la estructura completa permite determinar la influencia de los distintos sustratos.

Por la propia naturaleza de los materiales compuestos, los métodos de ensayo empleados para su caracterización son mucho más complejos que los empleados para materiales isótropos, y no todos ellos están normalizados. Sin embargo, sí que existen amplias referencias en la literatura¹⁻⁴.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES CONSTITUYENTES

3.2.1. Caracterización de fibras

Las propiedades ensayadas más comunes son el módulo longitudinal, la resistencia a tracción y el alargamiento a rotura. La norma ASTM D3379-75⁴ describe un ensayo apropiado para la caracterización de estos parámetros. Este método se recomienda para fibras con módulo elástico mayor de 21 Gpa. El ensayo se realiza sobre una fibra individual o filamento, que se monta a lo largo del eje central de un papel troquelado que permite tensar y alinear la fibra sin dañarla (Fig. 1). Una vez que la probeta se monta en la máquina de ensayo, el papel se rasga para permitir la elongación de la fibra. La Fig. 2 muestra una curva tensión-deformación típica del carbono.

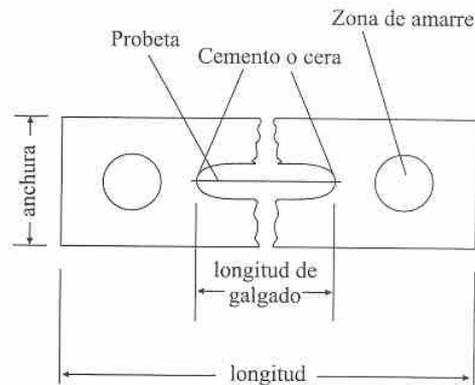


Fig. 1. Método de ensayo de filamentos

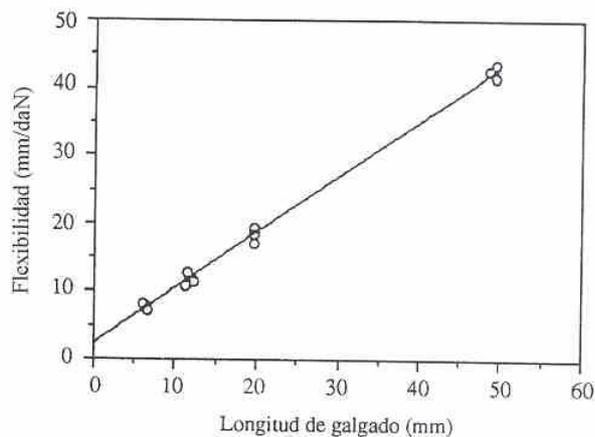


Fig. 2. Curva tensión-deformación típica (IM6, Hercules Inc.)⁵

3.2.2. Caracterización de matrices y adhesivos

La resistencia y módulo de tracción así como la deformación de rotura pueden determinarse usando paneles planos o probetas como la que se muestra en la Fig. 3. Los detalles de este método de ensayo se reflejan en la Norma ASTM D638M-84⁴ para un panel grueso (1,0 a 10,0 mm) y ASTM D638-78⁴ para un panel delgado (< 1,0 mm)

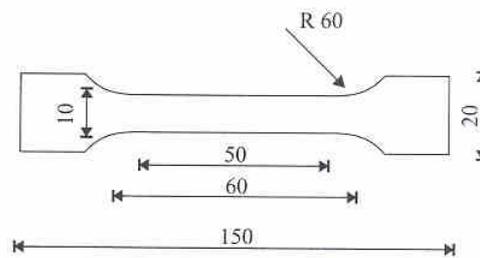


Fig. 3. Probeta de tracción para ensayos mecánicos en resina

Debido a la gran dependencia entre la velocidad de deformación y la velocidad de carga, los resultados de los ensayos deben ser interpretados cuidadosamente. La deformación puede medirse mediante bandas extensométricas o extensómetros. Si se quiere obtener el coeficiente de Poisson, la deformación transversal puede medirse mediante una banda extensométrica colocada perpendicularmente a la dirección de la carga.

3.3. CARACTERIZACIÓN DEL LAMINADO

3.3.1. Determinación de densidad y volumen de fibra

3.3.1.1. Densidad

La densidad de un material compuesto puede determinarse obteniendo el peso de la probeta en seco y sumergida en agua. La probeta puede ser cualquier pieza de tamaño y forma generales siempre que su volumen no sea inferior a 1 cm³. El peso de la probeta sumergida en agua puede determinarse por medio de un hilo fino que rodee la probeta y se una a uno de los extremos de una balanza. El recipiente no debe tocar ni el hilo ni la probeta y cualquier burbuja adherida al hilo o a la probeta debe eliminarse frotando con otro hilo. Los detalles de este método de ensayo se describen en la norma ASTM D3800-79.

La gravedad específica se determina a partir de la relación

$$\rho = \frac{a}{a + w - b} \dots\dots\dots [1]$$

donde a es el peso de la probeta en seco, w el peso del hilo parcialmente sumergido, y b el peso del conjunto probeta + hilo sumergidos. La densidad se obtiene multiplicando la gravedad específica por 0,9975.

3.3.1.2. Porcentaje de volumen en fibra

3.3.1.2.1. Método de la disolución en ácido

El contenido en fibra de los materiales compuestos de matriz orgánica se suele determinar disolviendo la resina del material compuesto en un medio que no ataque la fibra. Una vez que la resina está completamente disuelta, el residuo (la fibra) se filtra, limpia, seca y pesa. La elección del medio que disuelva la resina depende del tipo de matriz. Para las resinas epoxi, el medio más habitual es el ácido nítrico concentrado.

La Norma ASTM D3171-76 describe los detalles de este método de ensayo. El porcentaje en volumen de fibra se obtiene a partir del porcentaje en peso de la fibra y de las densidades de la fibra y del material compuesto.

$$\%V_f = \frac{w_f / \delta_f}{w_c / \delta_c} \times 100 \dots\dots\dots [2]$$

donde w_f es el peso de la fibra en el material compuesto, w_c el peso del material compuesto, δ_f la densidad de la fibra y δ_c la densidad del material compuesto.

Si se conoce la densidad de la matriz, δ_m , la fracción de volumen de vacíos V_v puede calcularse a partir de la relación:

$$V_v = 1 - \frac{[w_f/\delta_f + (w_c - w_f)/\delta_m]}{w_c/\delta_c} \dots\dots\dots[3]$$

3.3.1.2.2. Método directo

El porcentaje en volumen de fibra puede determinarse a partir de las densidades de la fibra, la matriz y el material compuesto, suponiendo que el contenido de vacíos es despreciable. En muchos casos, los materiales compuestos de matriz orgánica se fabrican con un contenido de vacíos menor del 1%. En estos casos se acepta calcular el porcentaje de volumen de fibra mediante la expresión:

$$\%V_f = \frac{\delta_c - \delta_m}{\delta_f - \delta_m} \times 100 \dots\dots\dots[4]$$

3.3.2. Determinación de las propiedades mecánicas de tracción

El ensayo de tracción uniaxial constituye el método fundamental para la determinación de datos tales como la especificación del material, inspección, investigación, desarrollo y cálculo de componentes estructurales. Las principales Normas europeas son

- UNE EN 2561:1996 Material aeroespacial. Plásticos reforzados con fibras de carbono. Estratificados unidireccionales. Ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra
- UNE EN 2597:1999 Material aeroespacial. Plásticos reforzados con fibras de carbono. Laminados unidireccionales. Ensayo de tracción perpendicular a la dirección de las fibras.
- UNE 53189-2: 1977 Materiales plásticos. Placas de materiales estratificados con resinas termoestables. Determinación de la resistencia a tracción.
- EN 61 (UNE 53280:1979) Plásticos. Plásticos reforzados con fibra de vidrio. Determinación de las propiedades de tracción.

La normativa americana para tracción en compuestos fibra-resina está recogida en la Norma ASTM D 3039. Existen ciertas diferencias entre este ensayo y la normativa europea. La EN 61 y otras como la UNE EN 2561 presentan diferencias tales como la longitud mínima de la probeta (que debe ser de 250 mm en el caso europeo), la forma de la probeta (la EN 61 admite tres tipos distintos), la longitud de las lengüetas de amarre (un mínimo de 50 mm en el caso europeo, y no tienen por qué terminar en bisel), el espesor para plásticos reforzados (que puede variar entre 2 y 10 mm) y el espesor para materiales aeroespaciales (que debe ser de 2 mm).

3.3.2.1. Probeta de ensayo

Se aceptan universalmente probetas rectangulares, de sección constante con lengüetas incorporadas en los extremos. La Tabla 1 representa las dimensiones recomendadas por la ASTM D 3039. La Fig. 4 muestra la geometría de la probeta

Tabla 1. Dimensiones recomendadas de la probeta en mm

Orientación de la fibra respecto a la carga	Anchura (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)
0 grados	12,7	127	1 a 2,54
90 grados	25,4	38	1 a 2,54
Multidireccional	25,4	127	1 a 2,54

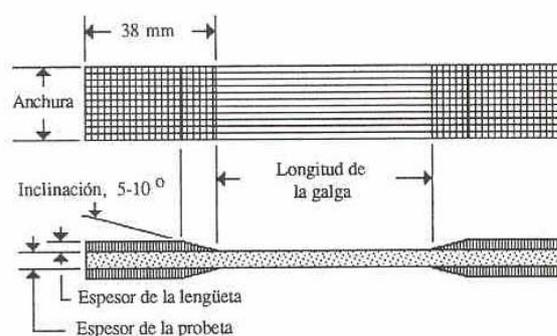


Fig. 4. Probeta de ensayo a tracción

3.3.2.2. Lengüetas de amarre

Se utilizan generalmente placas de tejido o laminado cruzado de vidrio E/epoxi y aluminio. Las probetas con fibras orientadas a 90 grados se ensayan frecuentemente sin lengüetas de amarre. La longitud de la lengüeta se determina en función de la resistencia a cortadura del adhesivo y la resistencia a tracción del material compuesto. Debe estar comprendida entre 25 y 38 mm.

El espesor de la lengüeta varía con el espesor de la probeta, y su rango de variación se encuentra entre 1,5 y 2,5 mm. Se recomienda utilizar cualquier adhesivo de alta deformación compatible con las condiciones ambientales. Finalmente, se recomienda preparar la superficie de unión mediante las operaciones de lijado y limpieza con un disolvente adecuado.

3.3.2.3. Procedimiento de ensayo

Determinar la anchura y el espesor en varios puntos, y tomar los valores mínimos para el cálculo de la sección de la probeta.

Aplicar la carga a través de una serie de mordazas en forma de cuña con objeto de generar la presión lateral suficiente para evitar el deslizamiento. Se recomienda que la superficie de la mordaza sea estriada.

La alineación de los ejes de la probeta respecto a la dirección de la carga es extremadamente importante.

Se recomienda una relación de deformación constante desde $16,7 \times 10^{-6}$ a $33,7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Se acepta también una velocidad de carga constante o una relación de carga constante correspondiente a la relación de deformación.

La medición de deformaciones se llevará a cabo mediante:

- Extensómetro de longitud de galga de 12,5 ó 25 mm
- Resistencia eléctrica de la galga de deformación: 350 ó 120 Ohm. Galga tipo lámina con longitud de 3,3 a 6,5 mm

Es deseable un voltaje bajo en el circuito de la galga extensométrica para minimizar la generación de calor. Se recomienda un voltio.

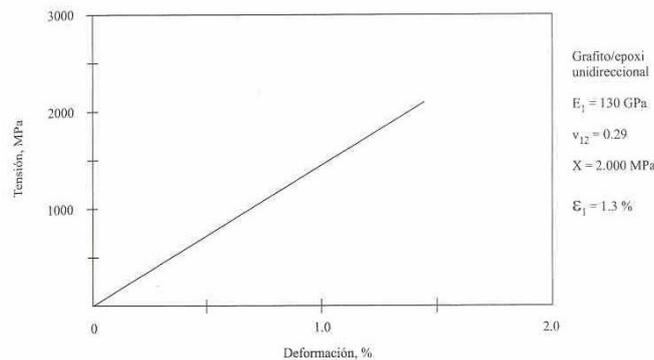


Fig. 5. Curva tensión-deformación para un material compuesto grafito-epoxi⁶

3.3.3. Determinación de la resistencia a cortadura plana

Este ensayo está recogido en la Norma Europea

UNE EN ISO 14129:1999 Materiales compuestos plásticos reforzados con fibras. Determinación de la respuesta de esfuerzo de cizalla/deformación a la cizalla plana, que incluye el módulo y la resistencia de cizalla plana por el método de ensayo de tracción a ±45°

Es un ensayo simple que sigue el mismo procedimiento que el ensayo de tracción. La Fig. 6 representa la probeta y el posicionamiento de dos galgas extensométricas. A partir de las deformaciones medidas transversal y longitudinalmente, podemos deducir el módulo de cortadura como sigue

$$S = \tau_{12} = \frac{P}{2bd} \dots\dots\dots [5]$$

$$G_{12} = \frac{S}{(|\epsilon_1| + |\epsilon_2|)} \dots\dots\dots [6]$$

donde P es la carga aplicada, b anchura de la probeta, d espesor de la probeta, S tensión de cortadura, y ϵ_1 y ϵ_2 deformaciones axial y longitudinal respectivamente. Este método presenta la ventaja de que la probeta es sencilla y barata de fabricar y no se requiere ningún utillaje especial. Destacar que la relación tensión-deformación a cortadura en un material compuesto no es lineal.

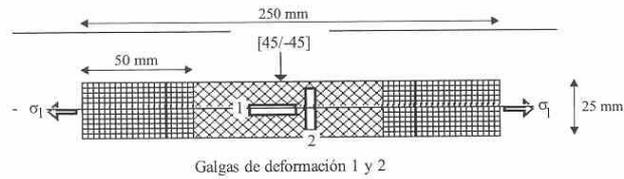


Fig. 6. Posicionamiento de las galgas extensométricas para la medida de las propiedades a cortadura a partir de una probeta $[45/-45]_{2s}$ a tracción

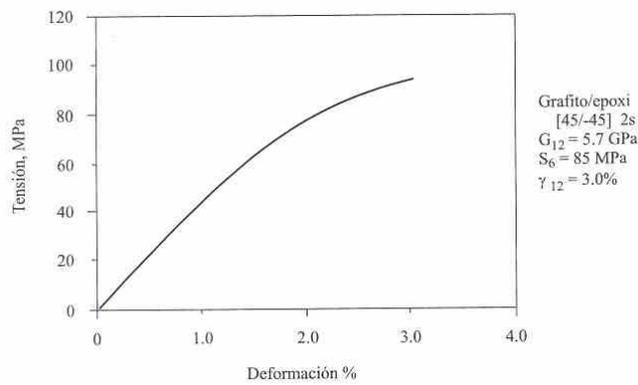


Fig. 7. Curva tensión-deformación de un ensayo a tracción de la probeta $[45/-45]_{2s}$ de un material compuesto grafito/epoxi⁶

3.4. CARACTERIZACIÓN DE LA ESTRUCTURA

No existen ensayos normalizados de los sistemas de refuerzo de estructuras de hormigón, fábrica de ladrillo o madera mediante laminados de carbono. Existen una serie de informes sobre estudios individuales, realizados por diversas instituciones. En este apartado se va a describir el estudio realizado por el autor, en colaboración con el Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad de Zaragoza, para la empresa NECSO.

3.4.1. Sistemas de refuerzo

La Fig. 8 muestra de forma esquemática los dos sistemas de refuerzo a estudiar: El refuerzo a flexión se ejecuta mediante la superposición de una serie de capas, hasta alcanzar un espesor dado, y siempre orientando las fibras en la dirección de máxima tracción. Para ello se fijan en la cara inferior de la viga, tratando así de evitar la aparición de grietas en las zonas de momento flector máximo que posteriormente progresarán en dirección vertical.

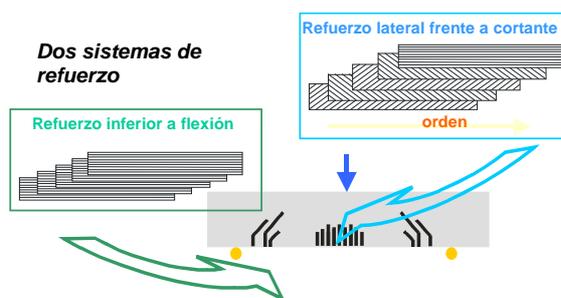


Fig. 8. Esquema de refuerzos estudiados

El refuerzo frente a esfuerzos cortantes, trata de prevenir la formación de grietas, que si bien siguen originándose por tensiones principales máximas (mecanismo de fallo dominante en los materiales frágiles como el hormigón), poseen una distribución más errática. Su progresión puede ser visualizada con la ayuda de las líneas isostáticas (familia de curvas envolventes de las direcciones principales). En una viga sometida simultáneamente a tensiones normales producidas por flexión, y tensiones tangenciales como resultado de los esfuerzos cortantes presentes, la relación entre ambas varía a lo largo de la longitud y altura del elemento, haciendo variar así la dirección de las tensiones principales desde 0° (paralela a la directriz de la viga) en las fibras extremas superior e inferior hasta formar 45° en la línea neutra. Ésta es la razón de que en el refuerzo a cortante se empleen laminados a $\pm 45^\circ$.

3.4.2. Preparación y geometría de las probetas

En la fabricación de las probetas, junto a las vigas de hormigón, se empleó un preimpregnado de fibra de carbono unidireccional y resina epoxi de la empresa ACG, y denominación LTM 45. Como adhesivo se empleó un compuesto comercial de uso específico, llamado Sikadur 30. Se trata de una adhesivo bicomponente basado en epoxi.

Para la preparación de las placas de refuerzo, se hizo uso de la bolsa de vacío. La Fig. 9 muestra el esquema de fabricación y distintas etapas de la misma.

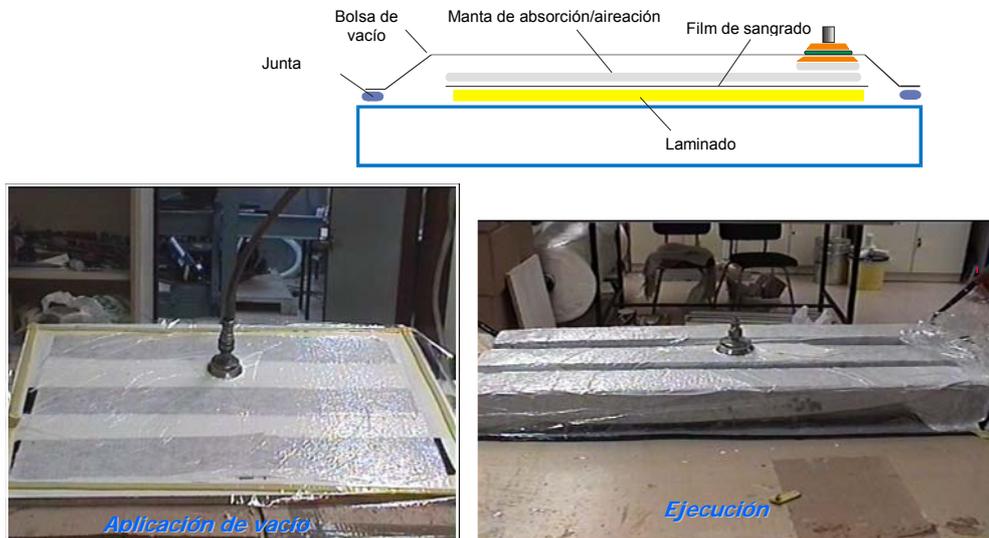


Fig. 9. Esquema de preparación de probetas

El estudio experimental realizado constó de dos fases: en primer lugar, y con el objeto de caracterizar el comportamiento del hormigón se ensayaron una serie de vigas compuestas únicamente de hormigón sin reforzar. En la segunda fase se procedió a ensayar las probetas fabricadas con refuerzo. Los resultados obtenidos, reacción y desplazamiento en un ensayo de flexión por tres puntos, ilustran el comportamiento tanto resistente como de deformación para los diferentes sistemas de refuerzo estudiados. La elección del método de ensayo, (flexión por tres puntos) responde a la facilidad de su realización y no tanto a la obtención de unos datos extrapolables a situaciones de carga o geometrías diferentes.

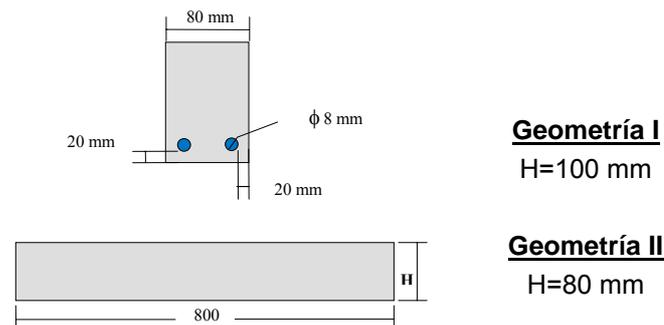


Fig. 10. Geometría de las probetas ensayadas.

3.4.3. Resultados

Se emplearon en el curso del estudio experimental cuatro tipos diferentes de probetas, correspondientes a dos geometrías y sistemas de refuerzo diferentes. Las dimensiones de ambas geometrías se muestran en la Fig. 10.

Los dos sistemas de refuerzo estudiados, flexión y flexión-cortadura, se ensayaron para una geometría diferente, empleándose en ambos casos el ensayo de vigas sin reforzar como método de control, utilizados para comparar sus resultados con aquellas probetas reforzadas y así poder extraer conclusiones acerca de la efectividad de la técnica de refuerzo empleada.

3.4.3.1. Vigas sin refuerzo

La siguiente figura muestra el instante previo al fallo de ambas vigas sin refuerzo.

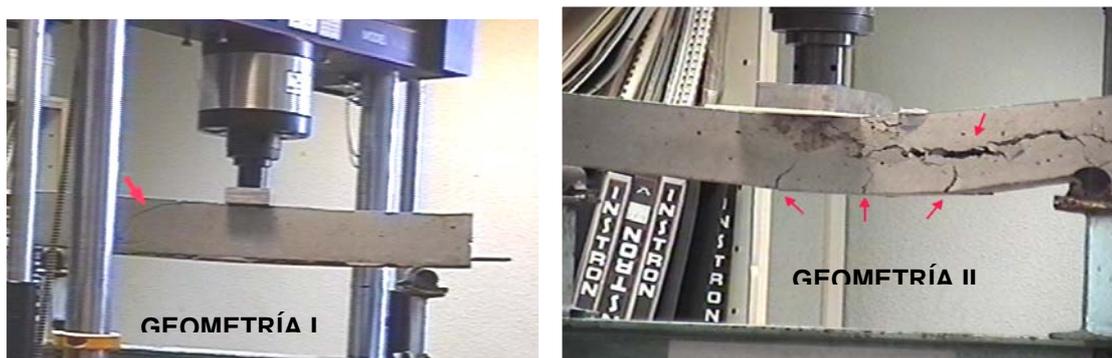


Fig. 11. Ensayo sobre probetas sin refuerzo

El modo de fallo detectado en el caso de la geometría I sin refuerzo corresponde predominantemente a cortadura, con la aparición de una grieta ascendente a 45 grados que inicia su progresión desde uno de los apoyos hasta alcanzar la zona de aplicación de la carga. En el caso de la geometría II se aprecian claramente tres grietas de tracción junto a una grieta que atraviesa casi por completo la longitud de la viga dividiendo ésta en dos. Los elevados valores de deflexión alcanzados son atribuibles al excesivo tamaño de árido presente, que provoca una deficiente cohesión en el seno de la viga y una reducida adherencia a las barras de acero.

3.4.3.2. Refuerzo a flexión

En cuanto a las vigas reforzadas, en el primer caso, el de refuerzo a flexión, el refuerzo empleado consiste de cinco capas de carbono unidireccional con un espesor total de 1.5 mm.

El sobredimensionado diseño a tracción resultante origina en esta situación un aumento de las tensiones tangenciales que provocan la aparición de características grietas por cortadura a 45 grados (Fig. 12). En todos los ensayos realizados, éstas aparecen en el extremo de la zona de refuerzo y ascienden hasta la zona de carga. Se puede apreciar así mismo la delaminación del adhesivo en la zona de apoyo.



Fig. 12. Viga con refuerzo inferior a flexión (Geometría I)

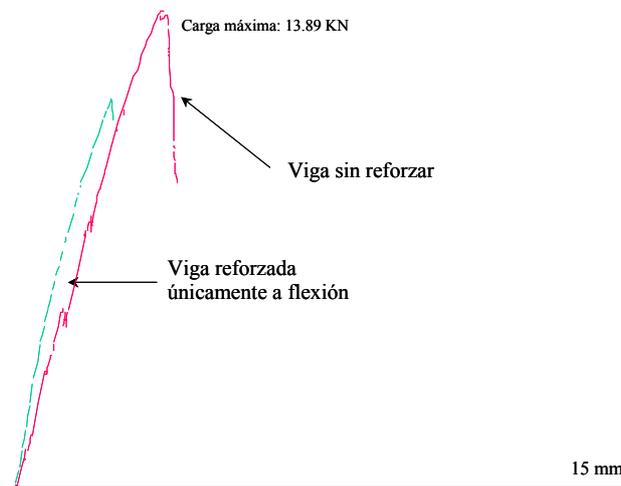


Fig. 13. Fuerza frente a flecha en el ensayo de la viga con refuerzo a flexión

El comportamiento es prácticamente lineal hasta el instante de fallo, con una brusca caída de la resistencia en torno a 14000 Newton. Una vez descargada, no se observó rastro de plasticidad ni corrosión en el acero de refuerzo. El comportamiento observado en este caso es similar al de la viga de referencia sin reforzar: comportamiento estable hasta el instante de fallo, en que la carga descende bruscamente. La rigidez en este caso es algo superior a la del caso sin carbono, y sin embargo el valor máximo de carga alcanzado se encuentra por debajo de aquél. La causa se halla en el deficiente diseño a cortante que resulta al reforzar únicamente a flexión una viga que carece de estribos ni armaduras verticales.

De la inspección de las vigas ensayadas se extraen las siguientes conclusiones:

- Se ha mantenido a lo largo de todo el ensayo la integridad de la unión carbono-adhesivo-sustrato. El empleo de este tipo de adhesivo, para este caso en concreto, ha resultado por tanto satisfactorio.
- Se ha logrado cierto aumento de rigidez, si bien la resistencia resultante se halla por debajo incluso de la de referencia (viga sin reforzar). Este comportamiento resulta por

tanto ineficiente, y las causas responsables de ello, ya detalladas, deberán solventarse mediante la ejecución de un refuerzo adecuado.

- El fallo de la estructura no se ha visto afectado por ningún tipo de defectos, mal estado de las barras de acero o del carbono. A excepción del hormigón, ninguno del resto de los elementos resistentes ha agotado su capacidad de carga. Se trata por tanto de un diseño mal aprovechado.

3.4.3.3. Refuerzo a flexión-cortadura

El refuerzo empleado consiste de seis capas de carbono dispuestas en la parte inferior de la viga y tres capas en cada uno de los laterales con orientación a ± 45 grados. La Fig. 14 muestra la viga ensayada.



Fig. 14. Viga con refuerzo inferior a flexión, lateral a cortadura (Geometría II)

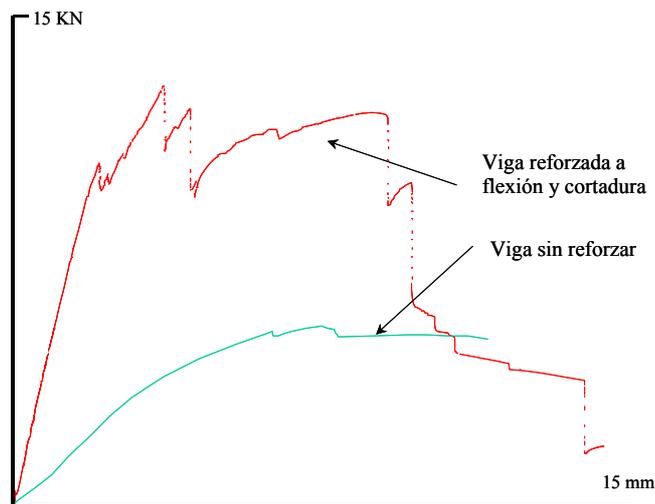


Fig. 13. Fuerza frente a flecha en el ensayo de la viga con refuerzo a flexión-cortadura

En este caso, el empleo del refuerzo sí es efectivo. El efecto de confinamiento hace que se elimine el deslizamiento que se observaba en las barras de acero, que se observa claramente en el ensayo de la viga sin reforzar. En una primera etapa se observa una zona lineal, hasta que se produce el fallo completo del hormigón. En ese momento, los distintos sistemas de refuerzo pasan a actuar, produciéndose el fallo progresivo en la adherencia de los mismos, lo que se traduce en un mantenimiento de la carga. Por último, la carga cae bruscamente cuando las láminas de refuerzo dejan de actuar al producirse una discontinuidad en la transmisión de esfuerzo (Fig. 14)

3.5. CONCLUSIONES

Aunque existen diversos métodos normalizados para la caracterización de los materiales constituyentes de los sistemas de refuerzo, como las fibras o resinas, y de los laminados que constituyen el elemento principal del sistema, no existe en general ningún procedimiento normalizado de ensayo del sistema de refuerzo. Por ello, es recomendable recurrir a procedimientos de cálculo contrastados o a métodos de análisis como elementos finitos. Un posible camino de homologación sería a través de la obtención de un Documento de Idoneidad Técnica, ya que el procedimiento de aplicación es vital a la hora de obtener un resultado adecuado.

3.6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.M. Whitney, I.M. Daniel, R. Byron Pipes, *Experimental Mechanics of Fiber Reinforced Composite Materials*, Monografía N° 4, Society for Experimental Mechanics, Bethel, CT, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, Rev. Ed. 1985.
- [2] I.M. Daniel, "Methods of Testing Composite Materials", *Fracture Mechanics and Methods of Testing*, G.C. Sih y A.M. Skudra, Vol. Eds. En *Handbook of Fibrous Composites*, A. Kelly y Y.N. Rabotnov, Eds., North Holland Publishing Co., Amsterdam, 1985, pp. 277-373.
- [3] I.M. Daniel, "Composite Materials", en *Handbook on Experimental Mechanics*, A.S. Kobayashi, Ed., VCH Publishers, New York, 1993, pp. 829-904.
- [4] *ASTM Standards and Literature References for Composite Materials*, 2nd Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1990.
- [5] C.-L. Tsai, I.M. Daniel, "Method for Thermomechanical Characterization of Single Fibers", *Composite Sci. Technol.*, Vol. 50, 1994, pp. 7-12.
- [6] A. Miravete et al., *Materiales Compuestos*, Vol. I y II, 2000

4. PUESTA EN OBRA

4.1. INTRODUCCIÓN

En alguna de las presentaciones anteriores se han descrito los sistemas de refuerzo de estructuras actualmente existentes, de qué materiales se componen, para qué se usan y cuales son la ventajas, en cada caso. A continuación se va a describir cuales son los procedimientos de puesta en obra. Este aspecto debe ser calificado como de especial importancia, pues no tiene ningún sentido que haya sistemas sofisticados de refuerzo perfectamente probados y con ellos realizar un buen diseño, si al final todo falla por no haber tenido en cuenta la importancia de una puesta en obra adecuada.

A continuación se describe la puesta en obra de los siguientes tipos de sistemas de refuerzo con materiales compuestos:

- Sistema de laminados a base de fibra de carbono.
- Sistema de tejidos a base de fibra de carbono.

4.2. SISTEMA DE LAMINADOS A BASE DE FIBRAS DE CARBONO

4.2.1. Materiales empleados

- Adhesivo tixotrópico de dos componentes, a base de resinas epoxi y cargas especiales. No contiene disolventes. El producto una vez endurecido posee altas resistencias mecánicas, excelente adherencia y muy buen comportamiento frente a ataques químicos.
- Laminado a base de un material compuesto de fibras de carbono con una matriz de resina epoxi. Es un producto anisótropo en el que todas las fibras van en sentido longitudinal.

4.2.2. Requerimientos generales

4.2.2.1. Requerimientos exigibles al soporte

Las condiciones que debe cumplir el soporte son las siguientes:

- La resistencia al arrancamiento realizada mediante ensayo SATEC debe ser mayor de 1,5 Mpa (15 Kg/cm^2).
- La planeidad de las superficies debe ser tal que las irregularidades cumplan lo siguiente:
 - Bajo regla de 2 m: $< 10 \text{ mm}$.
 - Bajo regla de 0,20 m: $< 4 \text{ mm}$.
- La porosidad superficial cumplirá:
 - Superficie del poro: $< 3 \text{ cm}^2$.
 - Profundidad: $< 5 \text{ mm}$.
 - Extensión: $< 10\%$ de la superficie total.
- Para el estado de la superficie se comprobarán los siguientes aspectos:
 - Alcalinidad: grado de carbonatación.
 - Humedad: $< 4\%$
 - Manchas:
 - aceites, grasas, productos de curado para obra reciente.
 - moho, vegetación, etc., en obras viejas.
 - Defectos: humedad, fisuras, cavidades, desconchados, etc.

4.2.2.2. Condiciones atmosféricas

La velocidad de polimerización de las resinas epoxi está relacionada con la temperatura de aplicación. Cuando las temperaturas sean superiores a las recomendadas, la vida de mezcla se acorta, sucediendo lo contrario cuando son inferiores. (Ver Hojas Técnicas).

A veces las necesidades de trabajo obligan a utilizar varios lotes uno detrás de otro. Se recomienda no mezclar el siguiente lote hasta no acabar el anterior para no reducir el tiempo de manejabilidad.

4.2.2.3. Trabajos previos a la ejecución

4.2.2.3.1. Preparación del soporte

- Saneado:

Las superficies a tratar se presentarán de tal manera que, en el momento de ejecutar los trabajos de refuerzo, estén en perfectas condiciones, para lo cual se eliminarán las lechadas superficiales, manchas, suciedad, partes mal adheridas, restos de otros oficios, etc, mediante repicado, cincelado, escarificado, abujardado o cualquier otro procedimiento manual o preferiblemente mecánico, hasta conseguir un soporte que reúna las condiciones idóneas, en cuanto a cohesión y rugosidad, que garanticen la buena adherencia físico-química del producto de pegado.

- Limpieza

Realizadas las operaciones de saneado y con el fin de obtener superficies totalmente limpias, éstas se someterán a cualquiera de los sistemas que a continuación se indican:

Chorro de arena: Es la más indicada para este tipo de trabajos. Consiste en proyectar sobre el soporte un chorro de arena de sílice mediante un compresor de caudal variable en función de la distancia al soporte, con una presión de 7 atm. aproximadamente. La granulometría de la arena estará comprendida entre 1 y 2 mm y el operario que realice el trabajo actuará provisto de una escafandra protectora ventilada con aire fresco .

Agua a alta presión: Consiste en proyectar sobre el soporte agua con una presión mínima de 150 atm, mediante un equipo especial, a través de una lanzadera provista de una boquilla adecuada y con una presión en bomba controlada con un manómetro.

Chorro de agua-arena: Sistema combinación de los otros mencionados, en el que se utiliza básicamente el equipo de chorro de agua a alta presión y una lanza de proyección con un dispositivo que permite incorporar la arena de sílice en la boquilla. (Efecto Venturi) .

Otros tipos: Pistola de aire comprimido, con agujas. Limpieza con chorro de vapor. Limpieza con llama. Tratamiento con ácidos.

Si se emplea cualquiera de los dos últimos tipos indicados, se comprobará posteriormente que la cohesión del soporte (interna y en superficie) no ha sido afectada por el tratamiento (choque térmico o ataque químico).

4.2.2.3.2. Regeneración

Sobre las superficies que hayan perdido espesor de recubrimiento se realizará una regeneración cuyas funciones son, por un lado, restituir el perfil original al elemento, y por otro, regularizar las superficies con el fin de que el espesor de resina epoxi sea mínimo.

Asimismo, se prestará especial atención a las superficies que vayan a recibir los laminados de refuerzo.

- La planeidad de las superficies:
 - Bajo regla de 2 m: < 10 mm.
 - Bajo regla de 0,20 m: < 4 mm.

Sobre las zonas en las que se haya perdido espesor de recubrimiento será preciso regenerarlas mediante morteros a base de resinas epoxi. Previamente se realizará la imprimación del soporte con el fin de garantizar la adherencia.

4.2.3. Transporte y preparación de los laminados

4.2.3.1. Transporte

Debido a la flexibilidad del material, que permite su fácil doblado, se recomienda el transporte de éste formando un rollo. Este rollo puede tener la longitud que se desee, pero se recomienda llevar todo lo que se vaya a usar en un sólo trozo (hasta una longitud de 250 m.) y efectuar el cortado del laminado en obra en las longitudes que se deseen.

4.2.3.2. Corte y preparación

El corte del laminado en las longitudes deseadas se hará en obra mediante una sierra manual.

La preparación de los laminados consiste, simplemente, en la limpieza del polvo y suciedad depositada en la cara que se va a pegar. La otra cara no necesita ninguna preparación. Esta limpieza se hará pasando por la superficie del laminado un papel impregnado con disolvente. Se efectuará esta operación hasta que no queden restos de suciedad o polvo sobre la superficie tratada

4.2.4. Puesta en obra

4.2.4.1. Aplicación del adhesivo sobre el soporte

El adhesivo es un producto de dos componentes a base de resinas epoxi y cargas especiales, que no contiene disolventes.

Para su aplicación, mezclar completamente los dos componentes con una batidora eléctrica de baja velocidad (máx. 600 r.p.m.), al menos durante dos minutos, hasta conseguir una pasta totalmente homogénea y de color gris.

Una vez limpiadas las superficies mediante chorro de arena u otro procedimiento y regularizadas, se procederá a la aplicación tanto sobre la chapa metálica, como sobre el soporte, de una película de entre 0,5 y 1 mm de espesor de adhesivo.

4.2.4.2. Aplicación del adhesivo sobre el laminado

Una vez limpio el laminado, se aplicará sobre la cara más rugosa (las dos caras del laminado no son iguales y no es indiferente aplicar el adhesivo en una cara u otra) una capa de entre 0,5 y 1 mm de espesor.

4.2.4.3. Colocación del laminado sobre el soporte

Una vez aplicado el adhesivo sobre soporte y laminado, se procederá a colocar éste sobre aquél. Primeramente se colocará el laminado sin ejercer presión hasta que se compruebe que está perfectamente situado en su sitio. Una vez que se haya conseguido la perfecta colocación se procederá a ejercer presión sobre el laminado mediante un rodillo de goma dura que se irá pasando a lo largo de toda la longitud. De esta forma se logrará que rebose el adhesivo sobrante por los lados, lo mismo que las posibles burbujas de aire. El adhesivo que haya rebosado debe quitarse con una espátula. Al final debe quedar una superficie continua de pegado, sin burbujas de aire ente el laminado y soporte.

Debido a su bajo peso, los laminados no necesitan ser apeados y se sostienen en el soporte desde el principio.

4.2.5. Recubrimiento de los laminados

4.2.5.1. Recubrimiento por cuestiones estéticas

Si se necesitará por razones estéticas, el laminado se puede recubrir con pinturas, tanto acrílicas como de resina epoxi.

4.2.5.2. Recubrimiento como protección contra incendios

Si se deseara proteger el refuerzo contra el fuego se recomienda la utilización de placas ignífugas. También se pueden utilizar pinturas ignífugas, previa comprobación de la adherencia y compatibilidad con el laminado mediante ensayos previos.

4.2.6. Puesta en carga

El adhesivo va adquiriendo sus resistencias desde el momento en que es colocado hasta conseguir el endurecimiento total a los 7 días. Por lo tanto es necesario esperar 7 días hasta sobrecargar el elemento estructural a su carga máxima, pudiendo cargarse previamente con sobrecargas inferiores que no hagan superar el límite de resistencia del adhesivo en cada momento.

4.2.7. Control de Calidad

4.2.7.1. Previo a la ejecución de los trabajos

Se deberán hacer controles tales como:

- Ensayos de resistencias mecánicas del hormigón.
- Ensayos de estabilidad y polimerización correcta del adhesivo:
 - Relación resina-endurecedor correcta.
 - Temperatura de aplicación .

4.2.7.2. Finalizados los trabajos de ejecución

Se pueden hacer controles tales como:

- Ensayos de adherencia por tracción directa.
- Pruebas de carga.

4.3. SISTEMA DE TEJIDOS A BASE DE FIBRAS DE CARBONO

4.3.1. Materiales empleados

4.3.1.1. Productos base

- Adhesivo de dos componentes a base de resinas epoxi: No contiene disolventes. El producto una vez endurecido posee altas resistencias mecánicas, excelente adherencia y muy buen comportamiento frente a ataques químicos.
- Tejidos a base de fibras de carbono de alta resistencia: Constituyen el elemento resistente del sistema.

4.3.1.2. Productos complementarios

- Mortero tixotrópico, a base de resinas epoxi, para regularización de superficies, exento de disolventes.
- Producto para inyecciones de dos componentes, a base de resinas epoxi, muy fluido y exento de disolventes.

4.3.2. Requerimientos generales para la ejecución del refuerzo

4.3.2.1. Requerimientos exigibles al soporte

Las condiciones que debe cumplir el soporte son las siguientes:

- La resistencia al arrancamiento realizada mediante ensayo SATEC debe ser mayor de 1,0 Mpa (10 Kg/cm^2).
- La planeidad de las superficies debe ser tal que las irregularidades sean menores de 0,5 mm.
- La porosidad superficial cumplirá:
 - Superficie del poro: $\leq 3 \text{ cm}^2$
 - Profundidad: $\leq 5 \text{ mm}$
 - Extensión: $\leq 10 \%$ de la superficie total
- Para el estado de la superficie se comprobarán los siguientes aspectos:
 - Alcalinidad: grado de carbonatación
 - Humedad: $< 4 \%$
 - Manchas:
 - aceites, grasas, productos de curado para obra reciente.
 - moho, vegetación, etc. en obras viejas.
 - Defectos: humedad, fisuras, cavidades, desconchados, etc.

4.3.2.2. Condiciones atmosféricas

La velocidad de polimerización de las resinas epoxi está relacionada con la temperatura de aplicación. Cuando las temperaturas sean superiores a las recomendadas, la vida de mezcla se acorta, sucediendo lo contrario cuando son inferiores. (Ver Hojas Técnicas).

A veces las necesidades de trabajo obligan a utilizar varios lotes uno detrás de otro. Se recomienda no mezclar el siguiente lote hasta no terminar el anterior para no reducir el tiempo de manejabilidad.

4.3.3. Trabajos previos a la ejecución

4.3.3.1. Preparación del soporte

4.3.3.1.1. Saneado

Las superficies a tratar se presentarán de tal manera que en el momento de ejecutar los trabajos de refuerzo, estén en perfectas condiciones, para lo cual se eliminarán las lechadas superficiales, manchas, suciedad, partes mal adheridas, restos de otros oficios, etc., mediante repicado, cincelado, escarificado, abujardado o cualquier otro procedimiento manual o preferiblemente mecánico, hasta conseguir un soporte que reúna las condiciones idóneas, en cuanto a cohesión y rugosidad, que garanticen la buena adherencia físico-química del producto de pegado.

4.3.3.1.2. Limpieza

Realizadas las operaciones de saneado y con el fin de obtener superficies totalmente limpias, éstas se someterán a cualquiera de los sistemas que a continuación se indican:

Chorro de arena: Es la más indicada para este tipo de trabajos. Consiste en proyectar sobre el soporte un chorro de arena de sílice mediante un Agua a alta presión con compresor de caudal variable en función de la distancia al soporte, con una presión de 7 atms. aproximadamente. La granulometría de la arena estará comprendida entre 1 y 2 mm. y el operario que realice el trabajo actuará provisto de una escafandra protectora ventilada con aire fresco.

Chorro de Agua: Consiste en proyectar sobre el soporte agua con una presión mínima de 150 atms mediante un equipo especial, a través de una lanzadera provista de una boquilla adecuada y con una presión en bomba controlada con un manómetro.

Chorro de agua-arena: Sistema combinación de los otros mencionados, en el que se utiliza básicamente el equipo de chorro de agua a alta presión y una lanza de proyección con un dispositivo que permite incorporar la arena de sílice en la boquilla. (Efecto Venturi).

4.3.4. Regeneración

Sobre las superficies que hayan perdido espesor de recubrimiento se realizará una regeneración cuyas funciones son, por un lado, restituir el perfil original al elemento, y por otro, regularizar las superficies con el fin de que el espesor de resina epoxi sea mínimo.

Asimismo, se prestará especial atención a las superficies que vayan a recibir los laminados del refuerzo debe ser tal que las irregularidades sean menores de 0,5 mm.

Sobre las zonas en las que se haya perdido espesor de recubrimiento será preciso regenerarlas a base de resinas epoxi. Previamente se realizará la imprimación del soporte con el fin de garantizar la adherencia.

4.3.5. Puesta en obra

4.3.5.1. Aplicación del adhesivo sobre el soporte

El adhesivo es un producto de dos componentes a base de resinas epoxi, que no contiene disolventes.

Para su aplicación, mezclar los dos componentes con una batidora eléctrica de baja velocidad (máx. 600 r.p.m) al menos durante dos minutos, hasta conseguir una pasta totalmente homogénea y de color gris claro.

Una vez limpiadas las superficies mediante chorro de arena u otro procedimiento y regularizadas, se procederá a la aplicación sobre el soporte, usando una paleta o brocha de la resina Sikadur® 330, en una cantidad aproximada de 0,7 a 1,2 Kg/m², dependiendo de la rugosidad del soporte.

4.3.5.2. Colocación del tejido sobre el soporte

Colocar el tejido sobre la resina en la dirección adecuada, embebiendo el tejido en la misma, presionando hasta que la resina salga por los huecos del tejido. Es importante conseguir que las fibras queden lo más rectas posibles, para lo cual hay que estirar con fuerza los tejidos.

4.3.5.3. Eliminación de los huecos o burbujas de aire

Una vez colocado el tejido sobre la superficie, se procede a repartir la resina con un rodillo hasta lograr una superficie homogénea y la completa eliminación de los huecos y burbujas de aire. Al final debe quedar una superficie continua de pegado, sin burbujas de aire entre el tejido y el soporte.

Debido al poco peso del tejido, no es necesario que sean apeados y se sostienen en el soporte desde el principio.

4.3.5.4. Recubrimiento del tejido

Como recubrimiento final, se aplicará una capa adicional de resina con un consumo aproximado de 0,5 Kg/m². La forma de aplicación más adecuada es con rodillo. Si se quiere se puede espolvorear sobre aquella arena de cuarzo que actuará de capa de agarre para posteriores recubrimientos cementosos.

4.3.6. Recubrimiento por cuestiones estéticas

Si se necesitara por razones estéticas, se puede recubrir el refuerzo con pinturas tanto acrílicas como de resina epoxi.

4.3.7. Recubrimiento como protección contra incendios

Si se deseara proteger el refuerzo contra el fuego, se recomienda la utilización de placas ignífugas. También se pueden utilizar pinturas ignífugas, previa comprobación de la adherencia y compatibilidad con el laminado mediante ensayos previos.

4.3.8. Puesta en carga

El adhesivo va adquiriendo sus resistencias desde el momento en que es colocado hasta conseguir el endurecimiento total a los 7 días. Por lo tanto es necesario esperar 7 días hasta sobrecargar el elemento estructural a su carga máxima, pudiendo cargarse previamente con sobrecargas inferiores que no hagan superar el límite de resistencia del adhesivo en cada momento.

4.3.9. Control de Calidad

4.3.9.1. Previo a la ejecución de los trabajos

Se deberán hacer controles tales como:



- Ensayos de resistencias mecánicas del hormigón.
- Ensayos de estabilidad y polimerización correcta del adhesivo
- Relación resina – endurecedor correcta
- Temperatura de aplicación (como regla general se puede admitir que una elevación de temperatura de 10 ° C duplica aproximadamente la velocidad de reacción).

4.3.9.2. Finalizados los trabajos de ejecución

Se pueden hacer controles tales como:

- Ensayos de adherencia por tracción directa.
- Pruebas de carga.