

CRITERIOS DE DISEÑO PARA EL REFUERZO DE ESTRUCTURAS CON MATERIALES COMPUESTOS CON FIBRA DE CARBONO. CASOS PRÁCTICOS

María Dolores Gómez Pulido*, Juan A. Sobrino Almunia**

RESUMEN

En la presente comunicación se describe un sistema de refuerzo de estructuras de hormigón aplicando materiales compuestos (M. C.), constituidos por fibras de carbono y resina epoxídica, en forma de laminados adheridos externamente a la estructura. Junto a una breve descripción del concepto de M. C. y sus propiedades, se resumirán los criterios de diseño empleados en el proyecto de las estructuras reforzadas con la mencionada tecnología (particularizados, fundamentalmente, para los laminados unidireccionales constituidos por fibras de carbono y resina epoxídica), así como los diversos procesos constructivos que se llevan a cabo según el tipo de M. C. aplicado en el refuerzo. Al final de trabajo se exponen diversas realizaciones y las principales conclusiones que se han obtenido a través de los refuerzos mediante laminados compuestos llevados a cabo.

1. INTRODUCCIÓN

La aplicación de laminados compuestos de fibra de carbono y resina epoxídica en el refuerzo de estructuras de hormigón, metálicas, de madera, de piedra, etc. comienza a constituir, en la presente década, una auténtica alternativa al sistema de refuerzo convencional mediante encolado de chapas de acero (fundamentalmente en refuerzos a flexión), tanto por sus mejores prestaciones mecánicas específicas y resistencia a la corrosión, como por los ahorros obtenidos en el proceso total del refuerzo, gracias a la ligereza que presentan los materiales compuestos, facilitando su transporte, manejo y puesta en obra, empleando medios auxiliares ligeros durante cortos periodos de tiempo.

La primera aplicación en España del presente sistema de refuerzo se llevó a cabo en el puen-

te del Dragó (Barcelona, 1.996). A nivel mundial, la primera estructura mediante láminas encoladas de materiales compuestos con fibra de carbono data de 1.991: el puente Ibach, en Lucerna. Tan sólo en Suiza y Alemania, el número de realizaciones de refuerzos de estructuras (tanto puentes como edificios) con láminas compuestas encoladas asciende a más de doscientas cincuenta, existiendo más de un millar mundialmente (concentradas, fundamentalmente, en Suiza, Alemania, Japón, EE.UU. y Canadá), Meier (92). En España, en la actualidad, podemos encontrar varias decenas de realizaciones.

2. MATERIALES COMPUESTOS

El término material compuesto se reserva para aquellos materiales bifásicos (fibra + matriz) fabricados expresamente para mejorar los va-

* Ingeniero de Caminis, Canales y Puertos (UPM), Master en Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería (UPC), España. e-mail: dpulido@pedelta.es

** Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos (UPC), España. e-mail: jsobrino@pedelta.es

lores de las propiedades que los materiales constituyentes presentan por separado, exhibiendo una interfaz identificable entre ellos. Si bien la variedad de los mismos es enorme, se cumple como denominador común la existencia de un elemento fibroso, que aporta rigidez y resistencia, con un ratio longitud/espesor claro, y una matriz (generalmente resina) que configura geoméricamente el material compuesto. Normalmente, la matriz es flexible y poco resistente, con la misión principal de transmitir los esfuerzos de unas fibras a otras, y entre ellas y la superficie adyacente, además de proteger a las fibras de posibles daños mecánicos y ambientales.

Las fibras empleadas pueden estar constituidas por carbono, vidrio, boro, aramida, metal, cerámica, etc. La naturaleza de las matrices también puede ser muy variada: orgánicas, minerales, metálicas, cerámicas, etc. Referente a las aplicaciones en la ingeniería civil, el mercado de los materiales compuestos lo conforman, mayoritariamente, las matrices orgánicas y las fibras de carbono, vidrio y aramida.

Como propiedades generales podemos destacar: elevadas resistencias mecánicas (comportamiento lineal hasta rotura), resistencia a la corrosión, resistencia a los ataques químicos, ligereza, presentación en cualquier longitud (eliminación de juntas), muy buen comportamiento a fatiga, buenas propiedades dieléctricas, etc.

Cuando las fibras, dentro del material compuesto, se encuentran orientadas en una única dirección (presentación industrial conocida como *roving*), nos encontramos con un material anisótropo, obteniéndose la máxima resistencia y módulo en la dirección del eje de las fibras. Una disposición del refuerzo en dos direcciones (presentación denominada *tejido*) produce diferentes resistencias según el ángulo que formen las fibras. En el caso de que las fibras se encuentren orientadas en todas direcciones (presentación denominada *mats*), el comportamiento del compuesto es isótropo,

reduciéndose sustancialmente los valores de la resistencia en relación con los obtenidos en los compuestos tipo roving según la dirección de las fibras.

La forma de los materiales compuestos más usual empleada en aplicaciones estructurales se denomina laminado, constituido por varias laminas de fino espesor. Dependiendo de la orientación de las fibras en cada lámina y de la secuencia de las mismas dentro del laminado se puede generar un amplio rango de propiedades mecánicas y físicas.

Las propiedades mecánicas del material compuesto, en cualquier dirección, dependen del porcentaje de fibras, en volumen, orientadas en la misma dirección, así como de las propiedades mecánicas de las fibras, de la longitud, forma y composición de las fibras, de las propiedades mecánicas de la resina y de la adherencia entre las fibras y matriz. Dichas propiedades dependen sobremanera de la dirección de medida en relación con la dirección de las fibras. Las propiedades de la matriz influyen en la resistencia a cortante del material compuesto, así como en las propiedades químicas, eléctricas y térmicas del compuesto, además de dar soporte lateral contra el pandeo de las fibras bajo solicitaciones de compresión, Miravete (95).

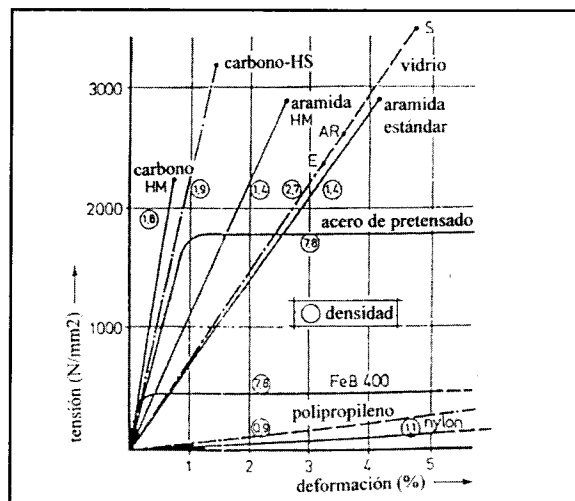


Figura 1 Densidades y curvas tensión - deformación (ensayo uniaxial), para diversas fibras sintéticas y aceros de armado y pretensado.

Para poder apreciar esta variabilidad de las propiedades de los materiales compuestos en función del tipo de fibra y de resina empleados, se adjunta en la figura n° 1 la relación tensión - deformación (ensayo uniaxial) para diversas fibras, así como para el acero de armado y pretensado; constatándose el carácter completamente lineal entre tensiones - deformaciones de los materiales compuestos llevados hasta rotura.

La mayor parte de los materiales compuestos presentan resistencias estáticas a largo plazo significativamente inferiores a las observadas a corto plazo, con fracciones aproximadas al 30%, 50% y 80% para el vidrio, aramida y carbón, respectivamente. Estas pérdidas de resistencia, experimentadas en los materiales compuestos ante carga sostenida (*creep rupture* o *static fracture*), pueden acelerarse ante condiciones ambientales adversas (presencia de agua, soluciones alcalinas o ácidas, radiaciones ultravioletas, etc.)

Las características mecánicas de las fibras de carbono no se alteran ante la presencia de humedad, disolventes, ácidos o bases, agentes atmosféricos, etc., permitiendo un contacto directo con el hormigón durante largos periodos de tiempo. Las fibras de aramida, si bien resisten la presencia de determinados disolventes y agentes químicos, se ven afectadas por la presencia de ácidos y bases, humedad, etc., experimentando una disminución de sus características resistentes en contacto con el hormigón. Las fibras de vidrio se deterioran al entrar en contacto directo con el hormigón y, aunque la matriz de resina del material compuesto podría protegerlas químicamente, no siempre es el caso. Las fibras más vulnerables a las radiaciones ultravioletas son las de aramida.

3. REFUERZO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

De entre los diversos métodos empleados en el refuerzo de estructuras, el encolado de chapas de acero mediante adhesivo estructural

constituye uno de los sistemas más ampliamente utilizado y de mayor eficacia (fundamentalmente en zonas traccionadas de refuerzos a flexión), sobre todo desde el desarrollo experimentado en los últimos años en las técnicas adhesivas

A pesar de la eficacia demostrada en el refuerzo mediante láminas encoladas de acero, nos encontramos con los siguientes inconvenientes manifiestos:

- Las láminas de acero constituyen elementos pesados en su manejo, transporte y ejecución, limitando las longitudes máximas de las chapas a 6 – 8 metros (surgiendo la problemática de las juntas). Debido a su elevada densidad, requieren medios auxiliares importantes para su apuntalamiento, empleados durante largos plazos de tiempo, pudiendo provocar molestias por los cortes de tráfico producidos o por la ejecución de obras en edificios en funcionamiento.
- Corrosión de la lámina de acero (afectando a la adherencia entre hormigón y chapa).
- Debido a la gran rigidez que presentan las chapas de acero, se requiere una elevada planeidad en las superficies de encolado.

Con la necesidad de solventar las deficiencias presentadas en la utilización de chapas metálicas, y ante el elevado y creciente número de estructuras existentes que requieren ser reforzadas, se desarrolló un sistema alternativo de refuerzo a flexión a base de materiales compuestos.

La resistencia a la corrosión de los laminados compuestos evita que la adherencia entre sustrato (hormigón, madera, etc.) y lámina sufra alteraciones, así como su reducida densidad frente al acero permite una mayor maniobrabilidad y facilidad en la ejecución, requiriéndose medios auxiliares ligeros con plazos de puesta en obra muy reducidos (las densidades de los diversos materiales compuestos

pueden apreciarse en la figura 1). Esta mayor ligereza de los materiales compuestos permite su transporte en rollos de hasta 300 m de longitud, evitando la problemática de las juntas. Como inconvenientes más representativos podemos enunciar el alto precio del material.

Gracias al empleo de medios auxiliares más ligeros y durante un plazo de tiempo menor, se pueden llegar a obtener ahorros de hasta un 25% en el proceso total del refuerzo, compensando, de este modo, el mayor precio de los materiales compuestos frente al del acero.

4. CRITERIOS DE DISEÑO

Como recomendaciones generales en el diseño de refuerzos de estructuras, tanto con materiales compuestos como con materiales más convencionales, podemos destacar las siguientes: evitar el colapso de la estructura en el caso de eliminación del refuerzo (accidente, vandalismo, etc.); contemplar el estado previo de deformaciones en la estructura antes de reforzar (redistribución de esfuerzos a nivel de estructura y seccional) y estudio de la idoneidad del refuerzo seleccionado.

El esquema general de cálculo comprendería la comprobación de la seguridad de la estructura sin reforzar (flexión, cortante, etc.), verificación de la seguridad de la estructura reforzada y verificación de los Estados Límites de Servicio.

La fiabilidad de una estructura reforzada con materiales compuestos depende sobremanera del tipo de material compuesto empleado (las características mecánicas de los mismos pueden variar con el tiempo, debido a fenómenos tales como el envejecimiento, etc.), la sollicitación de trabajo, condiciones ambientales a las que se verá sometida, etc., resultando compleja la extrapolación de los criterios de diseño y de los coeficientes de seguridad para los diferentes materiales compuestos, requiriéndose un estudio particular y riguroso para cada tipo de material y aplicación del mismo.

Las diferentes características mecánicas a largo plazo que presentan los diversos materiales compuestos provocan serias restricciones en las tensiones de trabajo, pudiendo diferir considerablemente respecto a las propiedades a corto plazo, con la consiguiente pérdida de capacidad portante de la estructura. Como consecuencia, se debe limitar la tensión admisible de trabajo para garantizar un nivel de seguridad adecuado. En la tabla 1, Malvar (98), se resumen los coeficientes de minoración de la resistencia última sugeridos por distintos códigos o autores para diferentes tipos de materiales compuestos (los coeficientes expuestos están referidos a materiales compuestos en forma de barra, no de laminados, aunque el comportamiento relativo entre los diversos materiales es similar), donde se evidencia la necesidad de no tomar las resistencias a corto plazo como referencia en el diseño de estructuras reforzadas con materiales compuestos, sino las propiedades a largo plazo que, como se constata, son extraordinariamente dependientes del tipo de fibra empleada. El símbolo r , presente en la tabla, representa la relación entre la carga permanente y la sobrecarga de uso. GFRP, AFRP y CFRP hacen referencia a los materiales compuestos constituidos por fibra de vidrio, aramida y carbono, respectivamente.

Tabla 1 Coeficientes de minoración de la resistencia última según distintos códigos y autores, tomados de Malvar (98).

CÓDIGO	GFRP*	AFRP*	CFRP
Canadiense†, $r > 2$	0.63	0.45	0.81
Canadiense†, $r \leq 2$	0.54	0.40	0.68
Japonés†	0.54	0.61	0.61
Eurocódigo 1	0.30	0.50	0.60
Propuesto en Malvar (98)	0.25	0.40	0.64

† Documento provisional

* Valores sin afectar por una eventual agresión de agentes químicos o ambientales

En la figura 2 se aprecian los diversos modos de rotura que se pueden experimentar en ele-

mentos estructurales reforzados con materiales compuestos adheridos en zonas traccionadas (refuerzos a flexión).

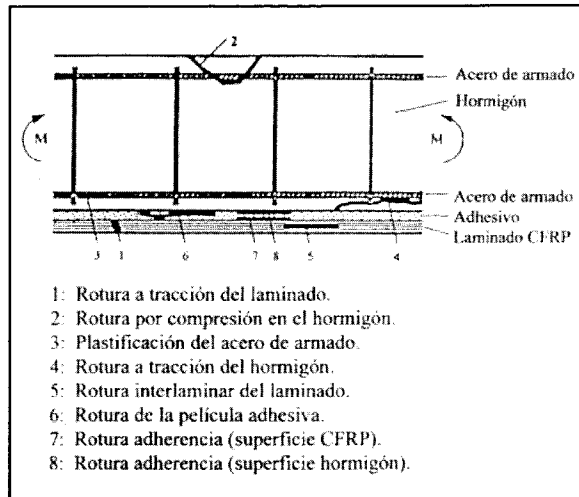


Figura 2 Sección longitudinal de una viga reforzada con láminas de materiales compuestos. Modos de rotura, Meier (92).

Los daños aquí señalados pueden conducir a roturas inmediatas del elemento o a roturas locales con efectos negativos para su capacidad portante.

En el Centro de Investigación suizo EMPA se han llevado a cabo (desde 1.985) de modo sistemático ensayos de estructuras reforzadas con láminas de materiales compuestos con fibra de carbono, bajo solicitaciones estáticas y dinámicas y con diferentes condiciones climáticas, Kaiser (89). Los modos de rotura observados fueron los siguientes:

- Rotura de la lámina (tipo 1 en la figura 2) al alcanzarse la resistencia a tracción de la misma.
- Rotura en la zona de compresión del hormigón al superarse la deformación máxima a compresión (tipo 2).
- Rotura del acero al superarse su resistencia a fatiga o al excederse la deformación de fluencia (tipo 3).
- Desprendimiento de la lámina de material compuesto (tipo 4). Debido a un desplazamiento vertical de la superficie inferior de la

viga provocado por irregularidades locales por insuficiente preparación de la superficie y/o a desplazamientos relativos de las paredes de las fisuras por fuerzas cortante, puede producirse la deflexión de la lámina; provocando grandes esfuerzos de tracción perpendicular a la lámina que podrían fisurar horizontalmente el hormigón y desprender la lámina en toda su longitud.

- No se presentó ninguna rotura del adhesivo a temperatura ambiente.

Las roturas tipo 1, 2 y 4 son graves por la rotura súbita que se puede producir en el elemento, mientras que los modos 5 a 8 pueden provocar una rotura local que, eventualmente, puede ser reparada.

4.1 Dimensionamiento a flexión

En el diseño de refuerzos a flexión se consideran, fundamentalmente, los mismos principios que se emplean en refuerzos mediante láminas de acero: equilibrio de la sección, compatibilidad de deformaciones e Hipótesis Navier-Bernouilli (secciones planas permanecen planas después de la deformación).

Los modelos constitutivos del hormigón y el acero son los comúnmente empleados (Código Modelo, Eurocódigos, etc.), mientras que para el material compuesto se utiliza una relación totalmente lineal entre tensiones y deformaciones hasta rotura. Si bien se trata de un método simplificado, los resultados obtenidos concuerdan con suficiente exactitud con los resultados experimentales.

Con objeto de obtener una respuesta seccional dúctil, así como una mayor resistencia a flexión, se debe diseñar el refuerzo de modo que la rotura de la lámina de material compuesto se produzca durante la plastificación del acero y antes de que el hormigón alcance la rotura por compresión.

Para el caso concreto de refuerzos de estructuras mediante laminados unidireccionales (tipo rovings) de fibra de carbono con resina epoxi-

dica, se exponen a continuación los principales criterios empleados en el diseño del refuerzo, basados en experimentos realizados en los laboratorios del EMPA, Kaiser (89) y Deuring (93):

- Los anchos efectivos de la sección, donde se puede considerar la colaboración del laminado compuesto con el resto de la estructura, se detallan en la figura 3.

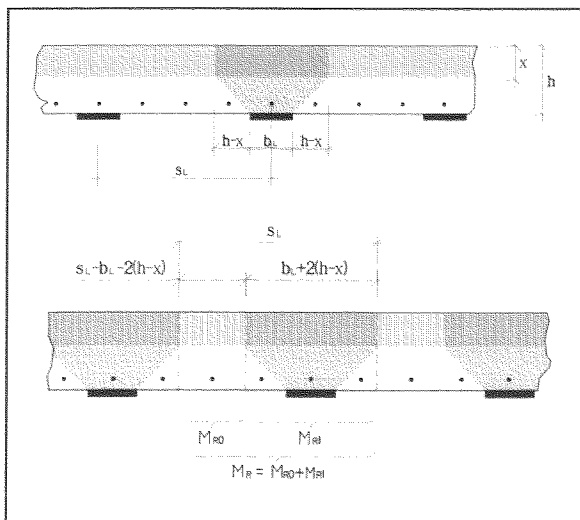


Figura 3 Determinación de anchos eficaces en secciones reforzadas.

donde:

h : canto de la estructura. x : bloque de compresiones. s_L : separación entre ejes de laminados. b_L : ancho del laminado. M_R : momento resistente de una sección de ancho s_L . M_{R0} : momento resistente de la zona reforzada. M_{R1} : momento resistente de la zona no reforzada

- Con objeto de considerar el efecto de la fisuración del hormigón se define un coeficiente de unión, k , que relaciona los valores medios de las deformaciones con los valores máximos en el acero y laminado, afectando a la respuesta última seccional. Como se detalla en la figura 4, mientras en el hormigón fisurado a tracción se puede considerar constante la deformación en el hormigón, las deformaciones en el acero y en los laminados compuestos oscilan alrededor de un valor

medio (zona entre fisuras), experimentando los valores máximos en las zonas próximas a las fisuras, traduciéndose en puntas en las tensiones de trabajo. Como los diagramas momento – curvatura representan la respuesta estructural de la sección en valores medios, la estructura no se agotará cuando se alcancen dichos valores, sino antes, debido al incremento de tensiones que se produce en las fisuras (el plano de deformaciones muestra los valores medios de las deformaciones en el acero y laminado, mientras que las tensiones y esfuerzos se refieren a la sección fisurada, donde se producen los valores máximos).

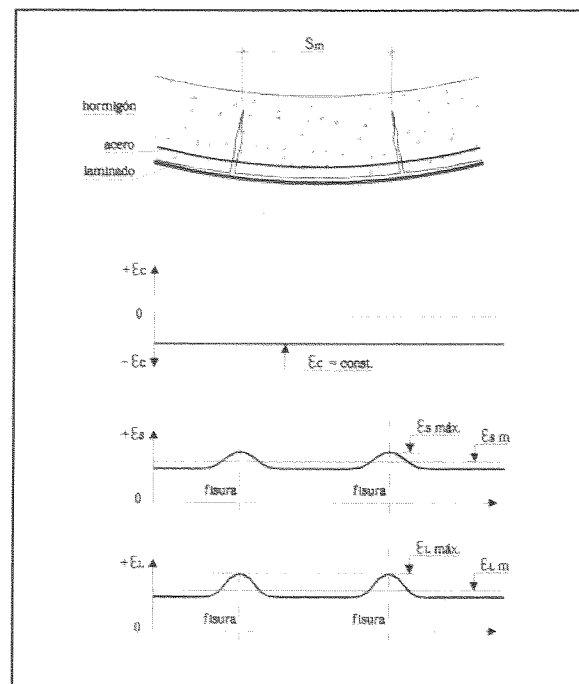


Figura 4 Distribución de deformaciones en zona fisurada.

donde:

s_m : separación media de fisuras. ϵ_c : deformación media del hormigón. ϵ_{sm} : deformación media del acero entre fisuras. ϵ_{Lm} : deformación media del laminado entre fisuras. $\epsilon_{s,máx.}$: deformación máxima del acero entre fisuras. $\epsilon_{L,máx.}$: deformación máxima del laminado entre fisuras.

Los diferentes valores de k se expresan a continuación:

Acero

$$\kappa_s = \frac{\varepsilon_{sm}}{\varepsilon_{s,max}} \quad \kappa_s \approx 0.9-1.0 \text{ para } \sigma_{s,max} \geq f_{yd}$$

$$\kappa_s \approx 0.8-0.9 \text{ para } \sigma_{s,max} < f_{yd}$$

Laminado

$$\kappa_L = \frac{\varepsilon_{Lm}}{\varepsilon_{L,max}} \quad \kappa_L \approx 0.6-0.8 \text{ para } \sigma_{s,max} = f_{Ld}$$

4.2 Dimensionamiento por deslaminación

Como se describió en el modo de rotura tipo 4 de la figura 2, el colapso de la estructura puede venir determinado por el desprendimiento del laminado (deslaminación). En la figura 5 se detalla gráficamente el proceso de deslaminación: las fisuras (de ancho w) producidas por solicitaciones de flexión, en zonas traccionadas, pueden experimentar un desplazamiento vertical relativo, d , entre los labios de la fisura por solicitaciones de cortante, sufriendo el laminado ese mismo desplazamiento vertical que, al estar traccionado, experimenta una fuerza de tracción perpendicular a la lámina, pudiendo provocar en el hormigón una fisura horizontal que se puede extender hasta el comienzo de la misma, desprendiéndola.

A continuación se adjunta una fórmula empírica propuesta para determinar la fuerza cortante que puede provocar el desprendimiento de la lámina (fenómeno de deslaminación), obtenida a partir de ensayos realizados en los laboratorios suizos EMPA, haciendo notar que, como en el caso del apartado de dimensionamiento a flexión, dichos resultados sólo son aplicables para el caso concreto de laminados unidireccionales con fibra de carbono y resina epoxídica, con un 60% en volumen de fibra. Dicha fórmula sólo puede emplearse en elementos sometidos a carga uniforme, no siendo válida en casos donde se produzcan simultáneamente grandes solicitaciones de momentos flectores y esfuerzos cortantes, tales como elementos con grandes cargas puntuales o zonas de momentos negativos con grandes áreas de

cortante (voladizos y zonas alrededor de columnas).

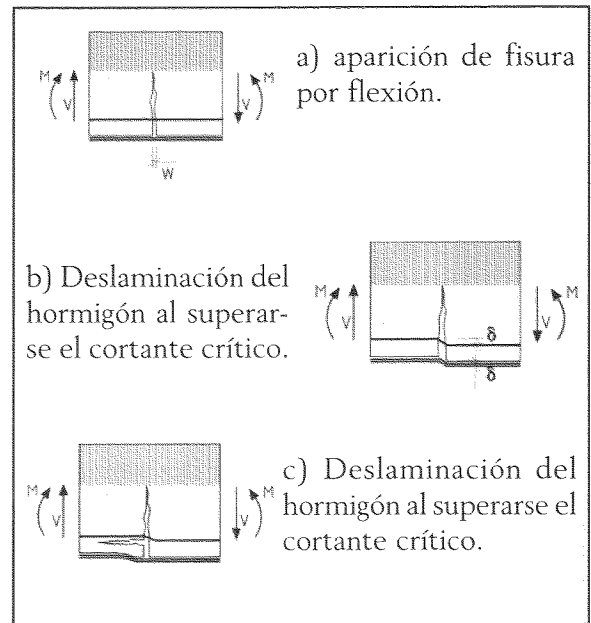


Figura 5 Proceso de deslaminación

$$V_A = \tau_{CA} b x + \sigma_{CA} b h - x \cdot 1_{Lm} / \quad E_s A_s \quad E_L A_L$$

$$\text{con } 1_{Lm} / \quad 0$$

donde:

V_A : cortante crítico de deslaminación. τ_{CA} : tensión cortante última del hormigón. b : ancho de la viga o elemento. h : canto de la viga o elemento x : posición de la fibra neutra. ε_{Lm} : deformación de la lámina. $E_s A_s$: módulo de deformación y área del acero de refuerzo. $E_L A_L$: módulo de deformación y área del laminado. χ , ξ : constantes determinadas experimentalmente donde se tiene en cuenta la calidad del hormigón

Los valores de x y ε_{Lm} se deben calcular en la sección con esfuerzo cortante máximo.

El primer sumando de la ecuación que determina el valor de V_A representa la transferencia de cortante en la zona de compresión del hormigón, el segundo la transferencia de cortante por la interfaz entre las paredes de la fisura

(efecto de encaje) y el tercero la transferencia de cortante debido a las fuerzas verticales en el acero de refuerzo y en el laminado provocadas por el desplazamiento vertical d (efecto de armadura pasante). Todo ello se puede apreciar en el gráfico de la figura 6.

Los coeficientes de minoración, en este caso, son mucho mayores que los empleados para el dimensionamiento a flexión, debido a la falta de deformación plástica de la lámina de material compuesto, la variabilidad del sistema de ejecución, el limitado número de ensayos disponibles, etc. Como ejemplo, la normativa suiza SIA emplea un factor de minoración de 1.2 en el caso de dimensionamiento a flexión y de 1.7 para el dimensionamiento por deslaminación.

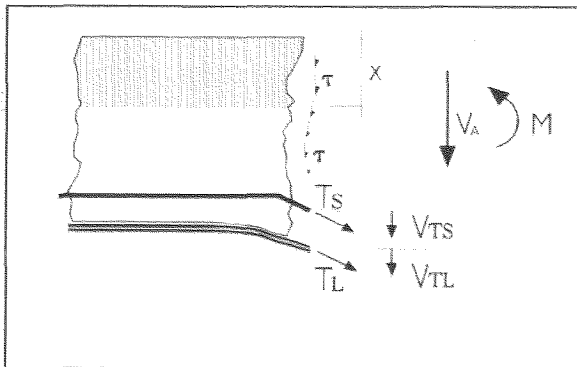


Figura 6 Cortante crítico de deslaminación.

4.3 Dimensionamiento del anclaje

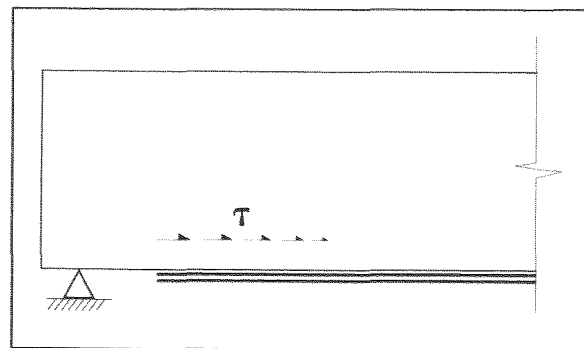
En estructuras reforzadas mediante láminas adheridas, se debe prestar especial atención a las tensiones rasantes en la interfaz hormigón – material compuesto y en los extremos de las láminas.

Las características adherentes de estos refuerzos dependen de numerosos factores: tamaño y tipo del refuerzo, condiciones del sustrato, coeficiente de Poisson, resistencia y confinamiento del hormigón, tipo de carga, efectos dependientes del tiempo, cantidad de recubrimiento, preparación del sustrato, tipo y volumen de la fibra y de la matriz, etc. Debido a esta enorme variabilidad, no existen criterios

de diseño generales, por lo que se precisa un estudio particular de cada refuerzo, contrastando con los resultados experimentales aplicables a cada caso.

En diversos refuerzos ejecutados se realizaron análisis por elementos finitos en régimen de tensión plana en las vigas reforzadas para estimar la longitud mínima de transferencia de rasantes desde las láminas de materiales compuestos hasta la superficie del hormigón, con objeto de no superar las tensiones rasantes admisibles (la distribución tipo de esfuerzos cortante en la interfaz hormigón – laminado se detalla en la figura 7, fallando el anclaje cuando la tensión rasante, t , transmitida al sustrato supera el valor admisible, $t_{c,adm}$). El modelo constitutivo empleado en el material compuesto fue elástico lineal y en el adhesivo un modelo de daño isotrópico escalar para poder representar el comportamiento de unión dúctil existente entre el laminado compuesto y el hormigón.

En los laboratorios EMPA se ha investigado y ensayado el anclaje de láminas CFRP. Si bien las reglas de diseño prácticas no están disponibles en el momento presente, se recomienda, como criterio conservador, la aplicación de las normas alemanas aprobadas para el cálculo de láminas metálicas (basadas en investigaciones de Ramich). En dicha formulación, adaptada a las láminas CFRP, se tienen en cuenta las propiedades mecánicas del laminado, el módulo de corte del adhesivo (factores, ambos, importantes en la capacidad de transferencia de cargas desde el laminado al sustrato de hormigón), etc.



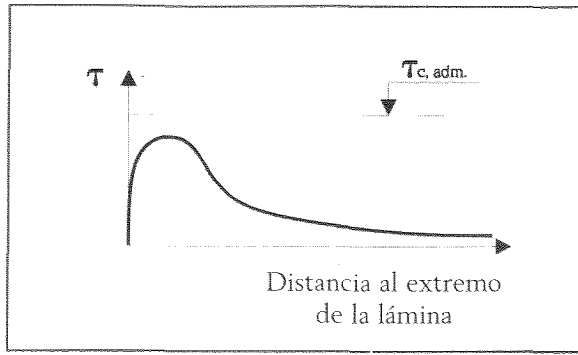


Figura 7 Distribución de esfuerzos rasantes en la interfaz hormigón - laminado a lo largo de la viga.

A continuación se expone la expresión de la longitud de anclaje mencionada, Schwegler (97):

$$l_b = \frac{(\gamma_R Z_{L,d})^2}{b_L^2 \kappa t_c \tau_k} \geq 500 \text{ mm} \quad \text{con } \gamma_R Z_{L,d} \leq f_{L,d} A_L \quad (2)$$

donde:

l_b : longitud de anclaje. γ_R : coeficiente de seguridad (1.2). b_L : ancho de la lámina. κ : tensión de referencia. $Z_{L,d}$: fuerza a anclar en la sección de máximo momento. t_c : ancho de una lámina de acero equivalente. τ_k : tensión adherente última, según ensayos

4.4 Dimensionamiento a cortante

El diseño de refuerzos a cortante se realizará por analogía al del cálculo de hormigón armado. Ante una insuficiencia de armadura de esfuerzo cortante en la estructura existente, incrementos de sobrecargas, cambios de uso, etc. se pueden emplear materiales compuestos tanto tipo roving como tejido (figura 8); garantizando en todo momento su anclaje y verificando que las tensiones rasantes transmitidas al hormigón sean inferiores a los valores admisibles.

Existen diversas formulaciones concretas para cada tipo de material ensayado, pudiendo aplicar las recomendaciones francesas para los tejidos de carbono con resina epoxídica, las sui-

zas para tejidos similares, tanto de carbono como de vidrio, las japonesas y canadienses, etc.

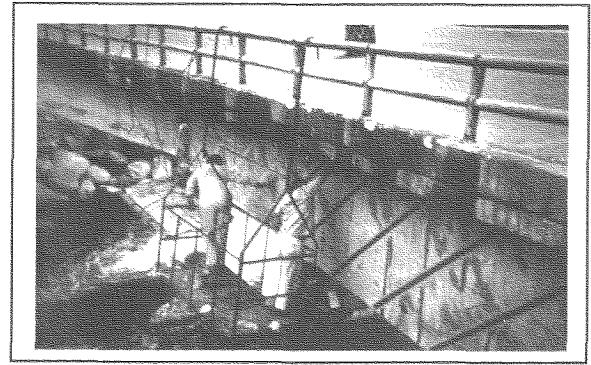


Figura 8 Aplicación de materiales compuestos, tipo roving, como refuerzo a cortante en puentes. Colombia.

4.5 Verificación de estados límites de servicio

Los Estados Límites de Servicio de elementos estructurales reforzados mediante materiales compuestos se describen en términos de limitaciones de flecha y de anchura de fisura. Existen numerosas formulaciones empíricas presentes en la literatura para determinar el ancho de fisura máximo y la rigidez de este tipo de estructuras, dependiendo de numerosos parámetros: módulo de deformación del material compuesto, su sección y espesor, tipo y espesor de resina empleada en la interfaz, etc.

Un criterio sencillo y conservador para verificar los Estados Límites de Servicio sería la aplicación de los criterios usualmente aceptados para el hormigón armado (los mecanismos adherentes que se desarrollan entre el acero interior y el hormigón son menos eficaces que los experimentados en los refuerzos mediante laminados compuestos, observándose en los últimos una fisuración más distribuida y de menor ancho).

5. EJECUCIÓN DE REFUERZOS CON MATERIALES COMPUESTOS

5.1 Preparación del sustrato de hormigón

El sustrato que recibirá las láminas de materiales compuestos debe responder a determinados criterios de recepción geométricas, mecánicas y físico – químicas.

Con objeto de soportar los esfuerzos rasantes transmitidos al sustrato a través de la interfaz hormigón – laminado compuesto, se recomiendan sustratos de hormigón con resistencia rasante admisible de 1.5 MPa (o, en su defecto, hormigones con $f_{ck} > 20$ MPa).

Los sustratos deben estar limpios de todo producto que pueda afectar a la buena adherencia del material compuesto: pintura, grasa, agentes desencofrantes, cuerpos de tipo orgánico o vegetal. Para el caso concreto de los tejidos de fibra de carbono (tipo TFC, etc.), su escasa sensibilidad a la humedad permite que los sustratos se presenten ligeramente húmedos.

5.2 Ejecución de laminados tipo roving

Preparada la superficie del sustrato, se procede a aplicar un adhesivo adecuado y compatible con las láminas empleadas sobre la zona de hormigón que las recibirá, con un espesor aproximado de 1 mm, mediante espátulas. Para la colocación del mismo se deben respetar todas las indicaciones específicas que el fabricante del adhesivo esponga.

Seguidamente, se colocan las láminas sobre una mesa o tabla y se limpian de todo tipo de partículas y suciedades, aplicando el mismo adhesivo anterior sobre las láminas mediante espátula con un espesor de 1 – 2 mm. Dentro del tiempo abierto del adhesivo, según la temperatura, se colocan las láminas sobre la superficie de hormigón. Utilizando un rodillo, se presiona la lámina contra el adhesivo hasta que éste rebose por ambos lados de la lámina, eliminando las partes sobrantes.

Por criterios estéticos (las láminas compuestas con fibras de carbono se presentan en color negro) se pueden pintar las láminas del color adecuado para hacer menos llamativa su presencia.

La ejecución de este tipo de refuerzos se puede apreciar en las figuras 9 a 12.

Es importante resaltar que el plazo de tiempo empleado en todo este proceso descrito no supera las dos-tres horas, por lo que lo convierte en un sistema de refuerzo conveniente donde se produzcan interrupciones de tráfico.

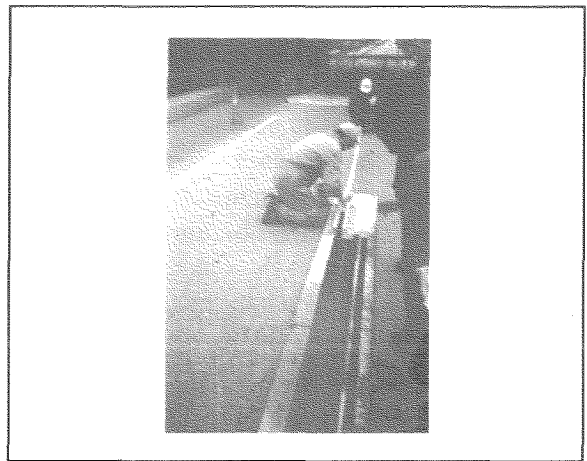


Figura 9 Impregnación con resina de las láminas compuestas antes de su colocación, puente nº 6 del Enlace del Escorial, Madrid.

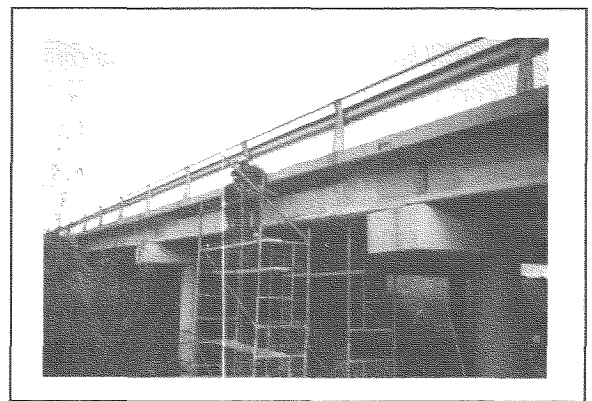


Figura 10 Medios auxiliares empleados (ligeros), puente nº 6 del Enlace del Escorial, Madrid.



Figura 11 Colocación de las láminas sobre la estructura, puente del Dragó, Barcelona.

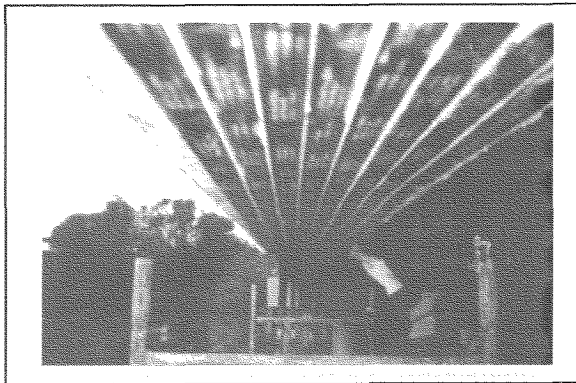


Figura 12 Eliminación del excedente de resina, puente nº 5 del Enlace del Escorial, Madrid.

5.3 Ejecución de laminados tipo tejidos

La ejecución de este tipo de refuerzos consta de la aplicación de una primera capa de resina epoxídica con medios que permitan la penetración de la misma a través de las irregularidades del sustrato, asegurando así una buena impregnación.

El tejido de fibras de carbono debe aplicarse sobre la capa de resina humedecida, extendiéndose de un extremo al otro, verificando que no existan pliegues ni que aparezca excesivamente estirada. Posteriormente se presiona sobre la resina, permitiendo que la resina impregne el tejido y la eliminación de eventuales burbujas de aire, mediante un rodillo.

Después de colocar el tejido se extiende una nueva capa de resina (llamada capa de cierre), aportando material epoxídico que permita im-

pregnar el tejido. Esta capa debe aplicarse inmediatamente después de la colocación del tejido (en ningún caso, después de la polimerización de la resina). No es determinante que el espesor de la capa de cierre sea estrictamente uniforme, pues no afecta a la resistencia del refuerzo.

6. REALIZACIONES

A continuación se describen diversas estructuras reforzadas con laminados de materiales compuestos con fibra de carbono y resina epoxídica.

6.1 Puente del Dragó, Barcelona

Se expone, resumidamente, la primera estructura reforzada con laminados de materiales compuestos (fibra de carbono y resina epoxídica) en España: el puente del Dragó, en Barcelona.

La estructura está constituida por dos tableros de vigas de canto constante. El esquema estático longitudinal de las estructuras se corresponde con el de un tablero continuo biapoyado, con dos tramos de luz aproximadamente similares (unos 12 m). Las 15 vigas que conforman el tablero son de hormigón armado y sección transversal rectangular, conectadas por un forjado de compresión de 20 cm de espesor y mediante traviesas a tercio de la luz.

Como consecuencia del impacto de un vehículo en la viga de borde, la totalidad de la armadura resistente a flexión longitudinal (6 barras de acero corrugado de f 25 mm) de la sección centro de vano resultó seccionada (figura 13). Por razones de seguridad estructural y de adecuado comportamiento en servicio, el puente debía ser reforzado con urgencia. Debido a los mayores plazos de ejecución y medios auxiliares requeridos en opciones alternativas de refuerzo estudiadas, se determinó la solución del refuerzo con materiales compuestos como la más adecuada para la reparación de la estructura.

El material compuesto empleado fue el constituido por fibras de carbono (tipo C, Toray T 700) y resina epoxídica. Las características del mismo son las siguientes (referidas a la dirección longitudinal de la fibra):

Resistencia a tracción: 24.000 Kp/cm²
Deformación última: 1.4 %
Módulo de deformación: 1.500.000 Kp/cm²
Densidad: 1.6 Kp/cm³
Contenido volumétrico de fibra: 60 %
Resistencia a la temperatura: > 500 °C.
Resistencia a la temperatura: > 500 °C.

Se emplearon láminas con un ancho total de 240 mm y un espesor de 1.2 mm. El espesor de la resina adherente fue de 1 mm. En la figura 14 se puede apreciar la situación final del puente del Dragó, una vez llevado a cabo el refuerzo.

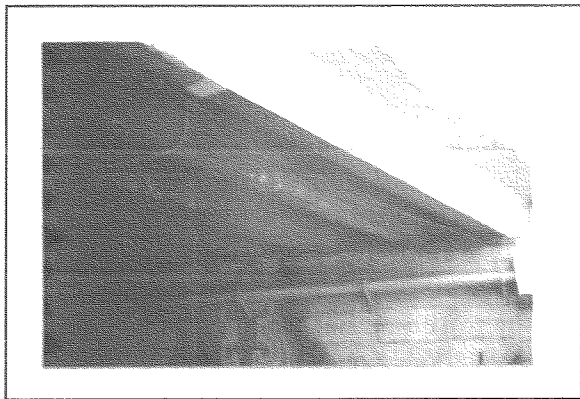


Figura 13 Viga de borde impactada, antes de reparar. Puente del Dragó, Barcelona.

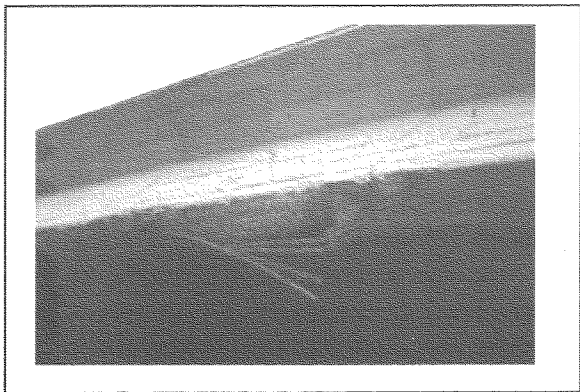


Figura 14 Vista del puente del Dragó, una vez finalizados los trabajos de refuerzo.

6.2 Puentes nº 5 y nº 6 del Enlace del Escorial, Madrid

Las estructuras nº 5 y nº 6 del Enlace del Escorial se encuentran en el tramo «Villalba – Caloco» de la Autopista A6, en Madrid, sufriendo ambos impactos de vehículos, provocados por gálibos muy estrictos, en 1.997.

• Estructura nº 5

Consta de dos tableros independientes, uno por cada sentido de circulación, bajo el tronco de la A6. Cada uno de los tableros presentan tres vanos isostáticos de unos 12.4 m de luz y 15.7 m de ancho, formados por ocho vigas de hormigón pretensado enlazadas por un forjado superior de hormigón armado de 22 cm.

El impacto del vehículo se produjo en el tramo central del tablero que soporta los carriles de la A6, concretamente en la viga de borde de la margen izquierda. La viga impactada, junto con su viga adyacente, presentaban un canto de 0.83 m. Los desperfectos producidos fueron: hormigón del ala inferior y del alma de la viga deteriorados, pérdida de acero de pretensado (aproximadamente un 80 % del pretensado inicial) y de armadura pasiva y revirado del alma de la viga (figura 15).

• Estructura nº 6

La estructura consta de dos puentes tableros, uno para cada sentido de circulación, constituido cada uno de ellos por tres vanos isostáticos de unos 14 m de luz.

La viga impactada fue la viga de borde del tramo central, formado por 12 vigas de hormigón pretensado, de 0.8 m de canto, enlazadas por un forjado superior de hormigón armado de 22 cm. Los daños causados fueron similares a los de la estructura nº 5: pérdida de acero de pretensado y armadura pasiva, hormigón totalmente deteriorado en ala inferior y fisuración en zona superior del alma (figura 16).

Debido al tráfico intenso que circunda la zona, se adoptó la solución de refuerzo con materiales compuestos, gracias a la rapidez de la ejecución del mismo.

Las reparaciones, restituciones y refuerzos propuestos se exponen a continuación: restitución del hormigón en todas aquellas zonas deterioradas por los impactos, sellado de todas las fisuras producidas, recrecido lateral de hormigón en ambos lados de las vigas de borde impactadas con objeto de garantizar un comportamiento monolítico de la viga e incremento de la capacidad portante de las vigas mediante un refuerzo constituido con láminas de material compuesto con fibra de carbono. El tipo de material empleado fue el mismo que el utilizado en el puente del Dragó (figuras 17 a 19).

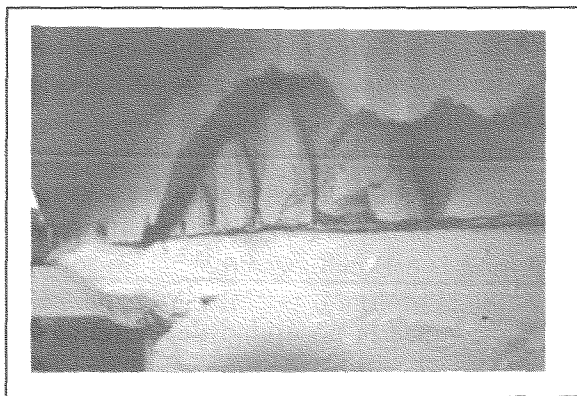


Figura 15 Deterioros en viga de borde impactada, puente nº 5 del Enlace del Escorial, Madrid.

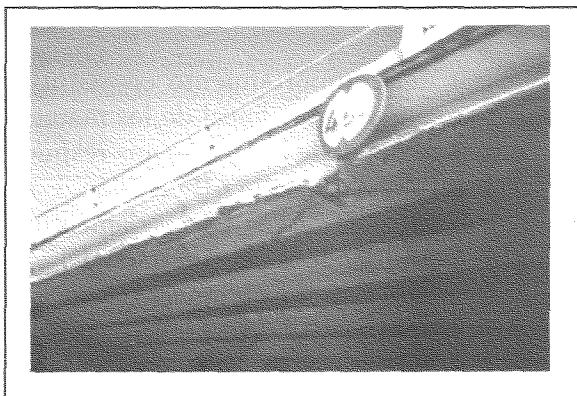


Figura 16 Deterioros en viga de borde impactada, puente nº 6 del Enlace del Escorial, Madrid.

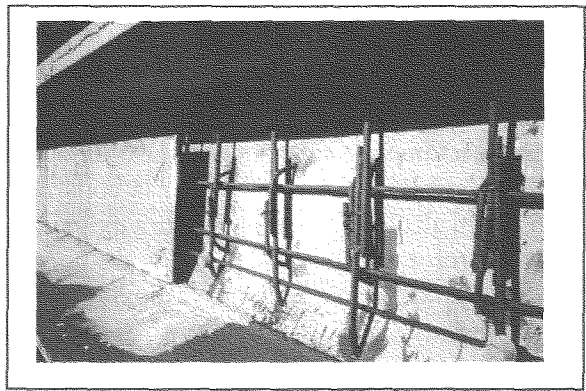


Figura 17 Recrecido de las almas (encofrado y armadura). Puente nº 6 del Enlace del Escorial.

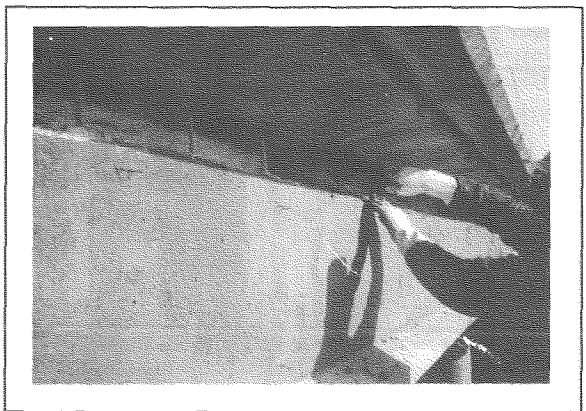


Figura 18 Remate en el hormigonado del recrecido de las almas. Puente nº 5 del Enlace del Escorial.

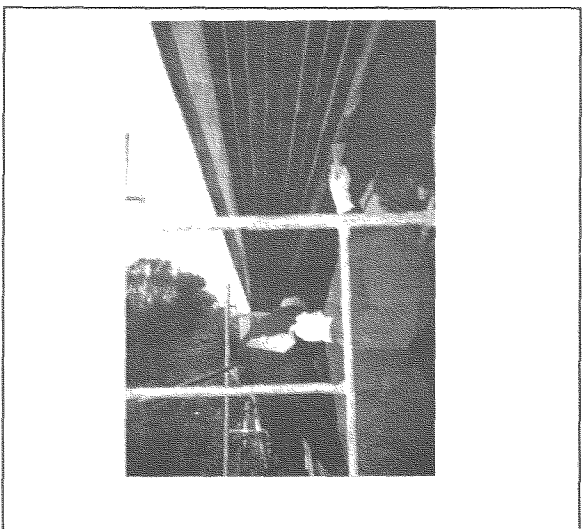


Figura 19 Colocación de los laminados. Puente nº 5 del Enlace del Escorial.

6.3 Instalaciones de un concesionario de automóviles en Lleida

El incremento de las cargas experimentado en las instalaciones de un concesionario de automóviles en Lleida, provocado por la construcción de un altillo sobre la estructura existente, obligó a reforzar diversos pórticos de hormigón armado de la misma, tanto a flexión como a cortante.

El refuerzo proyectado consistía en la aplicación de tejido de fibra de carbono (60% resina, 40% tejido), ejecutándose finalmente mediante laminado unidireccional por motivos de disponibilidad del material en fábrica (figura 20).

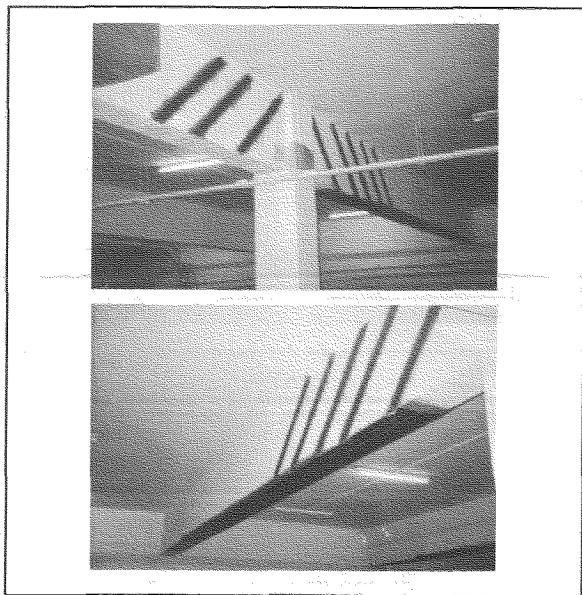


Figura 20 Refuerzo a cortante y flexión. Instalaciones de un concesionario de automóviles en Lleida.

7. CONCLUSIONES

Con todo lo expresado anteriormente sobre el sistema de refuerzo a flexión mediante la aplicación de materiales compuestos con fibra de carbono podemos concluir los siguientes puntos:

- El rango de aplicación del sistema de refuerzo mediante materiales compuestos es muy

amplio, pudiéndose llevar a cabo no sólo donde los requerimientos de altas prestaciones y/o la maniobrabilidad y rapidez de la ejecución constituyan un punto importante, sino, también, donde el **planteamiento** sea estrictamente **económico**, gracias al ahorro que se obtiene por la utilización de medios auxiliares ligeros con plazos de ejecución mínimos (del orden de hasta un 25% frente a otras alternativas de refuerzo más convencionales). La reducción importante de los plazos de ejecución le convierte en un sistema de refuerzo muy adecuado donde se produzcan interrupciones de tráfico, etc.

- De entre los diversos materiales compuestos existentes, los constituidos por **fibra de carbono** representan el material idóneo para el refuerzo pasivo de estructuras de hormigón, gracias a la inalterabilidad de las características mecánicas de dichas fibras ante la presencia de humedad, disolventes, ácidos o bases, agentes atmosféricos, etc. (permitiendo un contacto directo con el hormigón durante largos periodos de tiempo), junto a sus elevadas resistencias a largo plazo (en relación a los valores obtenidos a corto plazo) incluso bajo carga sostenida.

- Se evidencia la necesidad de no tomar las resistencias a corto plazo como referencia en el diseño de estructuras reforzadas con materiales compuestos, sino las propiedades a largo plazo, extraordinariamente dependientes del tipo de fibra empleada.

- A pesar del comportamiento constitutivo completamente elástico lineal de los materiales compuestos, puede obtenerse una **respuesta seccional** de la estructura (hormigón + refuerzo) **dúctil** si se diseña adecuadamente el refuerzo, permitiendo la plastificación del acero de armar antes de que el refuerzo alcance su deformación última.

- En la fiabilidad de una estructura reforzada con materiales compuestos **influye sobremanera** el tipo de material compuesto, la solicita-

ción de trabajo, condiciones ambientales, etc., por lo que resulta compleja la extrapolación de los criterios de diseño y de los diferentes coeficientes de seguridad para los diferentes materiales compuestos, requiriéndose un **estudio particular** para cada material y aplicación del mismo.

- La aplicación de los laminados compuestos como refuerzo pasivo externamente adherido a puentes está ligado a la evaluación de puentes existentes, la cual no se debe abordar con los mismos criterios incluidos en una normativa de proyecto. En los casos de evaluación estructuras ya construidas, el nivel de incertidumbre se reduce notablemente respecto de las situaciones de proyecto. Por otra parte, en el caso de estructuras antiguas, éstas pueden haber sido proyectadas con criterios y sobrecargas totalmente distintos a los valores vigentes y, como consecuencia, **los coeficientes de seguridad de las normas de proyecto actuales no se deben aplicar**, G. Pulido y Sobrino (98).

- Mediante **modelos constitutivos** muy **específicos**, se puede simular numéricamente la concentración de tensiones rasantes en los extremos de las láminas adheridas al hormigón, constatando el carácter dúctil de la unión entre las láminas compuestas y el hormigón, pudiéndose optimizar y evaluar, de modo riguroso, el refuerzo necesario.

8. REFERENCIAS

DEURING, M.: *Verstärken von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen*. Swiss Federal Laboratories for Material Testing and Research EMPA. EMPA – report Nr. 224, 1.993.

GERRITSE, A.: *Prestressing with Arapree: the artificial tendon*. Symposium on New Materials for Prestressing and Reinforcement of Heavy Structures; Paris, October 25-26, 1.998.

G. PULIDO, M.D. y SOBRINO, J.: *Los Materiales Compuestos en el Refuerzo de Puentes*. Revista Internacional de Ingeniería y Estructuras (en prensa). Eds.: Alex H. Barbat y Roberto Aguilar. Ecuador, 1.998.

G. PULIDO, M.D. y SOBRINO, J.: *Aplicaciones de Materiales Compuestos en el Refuerzo de Puentes*. Curso de Estudios Mayores de la Construcción, CEMCOXIV-98, Instituto Eduardo Torroja, CSIC. Madrid, 22 de Febrero - 26 de Junio de 1.998.

G. PULIDO, M. D. y SOBRINO, J.: *Reparación de deterioros por impactos de vehículos*. Curso sobre: Conservación, Reparación y rehabilitación de Puentes de Hormigón. INTEVÍA, Madrid, 22-24 de Septiembre de 1.997.

KAISER: *Bewehren von Stahlbeton mit kohlenstoffaserverstärkten Epoxidharzen*. Dissertation. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Diss. ETH Nr. 8918, 1.989.

MALVAR, L.J.: *Durability of Composites in Reinforced Concrete*. CDCC '98 – First International Conference on Durability of Composites for Construction. Sherbrooke (Québec), Canada. August, 1.998.

MEIER, U. et al.: *Strengthening of structures with CFRP laminates: Research and applications in Switzerland*. Advanced composite materials in bridges and structures, 1st International Conference, Shebrooke, Canada, 1.992.

MIRAVETE, A.: *Los nuevos materiales en la construcción*. Centro Politécnico Superior Universidad de Zaragoza, 1.995.

RITCHIE, P. A. et al.: *External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics*. ACI Structural Journal, Vol. 88, No 4, pp. 490-500.

SCHWEGLER, G.: SIKA internal report, Zurich, 1.997.

TRIANAFILLOU, T. C. et al.: *Strengthening of concrete structures with prestressed fiber reinforced plastic sheets*. ACI Structural Journal, Vol. 89, No 3, pp. 235-244.