

Refuerzos estructurales de puentes de vigas frente a impactos

Structural strengthening of beam and slab decks against impacts loads

Jose Olivas Ruiz ^{a,*}, Tomás Ripa Alonso^b, Diego Cerezo San Frutos^c

^a Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, LRA Infrastructures Consulting, Ingeniero de Estructuras, joseolivas@lraingenieria.es

^b Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, LRA Infrastructures Consulting, Socio Director, tomasripa@lraingenieria.es

^c Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, LRA Infrastructures Consulting, Ingeniero de Estructuras, diegocerezo@lraingenieria.es

RESUMEN

El impacto de vehículos contra estructuras existentes, concretamente sobre puentes de vigas, genera una serie de deterioros que comprometen en gran medida parte de los mecanismos resistentes de las vigas. En la presente ponencia se abordará el estudio de los daños habituales ocasionados, en particular de la rotura del alma de las vigas afectadas, y las posibilidades de reparación mediante el uso de materiales compuestos, enunciando los principios de diseño de dichos materiales y presentando un ejemplo de aplicación.

ABSTRACT

The impact of vehicles against existing structures, in particular against beam and slabs decks, generates a series of deteriorations that largely compromise the resistant mechanisms of the beams. This paper will deal with the study of the usual damage caused, in particular the failure of the beam's web affected, and the possibilities of repair with the use of composite materials, stating the design principles of these materials and presenting an example of application.

PALABRAS CLAVE: Rehabilitación estructuras existentes, refuerzos estructurales, materiales compuestos.

KEYWORDS: Rehabilitation of existing structures, structural strengthening, composite materials.

1. Introducción

Los impactos sobre puentes de vigas, entendidos como el choque violento de un vehículo contra el tablero del puente, es una problemática que aunque evitable, aún está presente en un gran número de estructuras debido principalmente a la incorrecta señalización del gálibo o a la imprudencia de los usuarios desconocedores de las dimensiones de sus vehículos o cargas.



Figura 1. Impacto sobre viga.

Los deterioros resultantes de estos impactos, están directamente relacionados con la rehabilitación y refuerzo de la parte afectada. Concretamente, la gravedad y el tipo de afección provocada por el impacto definen su rehabilitación, pudiendo limitarse a una mera reparación superficial o al refuerzo de ciertos o todos los elementos estructurales implicados.

En el caso particular de puentes de vigas de hormigón, debido a su propia tipología, convencionalmente se ha planteado la reparación mediante la incorporación de armaduras en la cabeza de tracción de la viga y su posterior reconstrucción, la adhesión de platabandas metálicas en el alma o ala de las vigas o la incorporación de postesados exteriores. Todos estos sistemas en los últimos años han ido sustituyéndose por el uso de otras técnicas de refuerzo mediante la aplicación de materiales compuestos, los cuales presentan mayores ventajas frente a los anteriores, principalmente asociados a su facilidad de montaje debido a su bajo peso y maleabilidad, a

su alta durabilidad y a sus mejores prestaciones mecánicas.

El contenido de la presente ponencia se centrará en el estudio de las posibilidades de refuerzo de vigas dañadas mediante el uso de materiales compuestos reforzados con fibras de carbono (FRP) en su forma de laminados y tejidos.

2. Daños y soluciones asociadas a los deterioros ocasionados

Por lo general, el impacto sobre las vigas de un puente da lugar a daños estructurales graves en cuanto se ve mermada la capacidad resistente de la viga, acrecentándose la gravedad en función de la magnitud del impacto, la robustez y esbeltez de las vigas afectadas.

Los principales deterioros producidos por un impacto se concentran en la cabeza inferior de las vigas y en la conexión ala-alma, estando localizados principalmente en la viga extrema (la cual recibe el impacto) y en las adyacentes en función de donde se detiene el vehículo.

Por un lado, en las cabezas inferiores de las vigas se observan los daños provocados por el propio impacto con pérdida de sección del hormigón y quedando al descubierto los torones de pretensado (Figura 2), limitándose de esta forma la transmisión de la fuerza de pretensado por falta de adherencia y por ende, en caso de producirse su rotura, reduciendo la resistencia última a flexión.



Figura 2. Daños provocados por el impacto cabeza inferior de la viga.

Asimismo, destacar que si la magnitud del impacto es importante, se puede llegar a producir la rotura del alma en la unión con la cabeza superior de la viga debido al giro inducido por éste. Dicha rotura se manifiesta en fisuras cuasi-horizontal que se desarrollan tanto en la unión alma-ala superior de la cara extrema de la viga, como en la unión ala-alma de la cara interior de la viga (Figura 3), agravándose de forma notable el daño sufrido por la viga, debido a que la resistencia a cortante del alma se ve afectada, al no poder desarrollarse un mecanismo resistente a cortante con bielas de compresión inclinadas a canto completo.



Figura 3. Detalle de rotura del alma.

Así también, la transmisión localizada del esfuerzo rasante entre la cabeza de compresión y el alma está igualmente comprometida debido a la posible plastificación de las armaduras de cosido de la fibra ala-alma. En otras palabras, la reducción de la resistencia a esfuerzo rasante no es sino otra manifestación del mecanismo de resistencia a flexión y cortante que se ve seriamente dañado por el impacto.

Por tanto, el impacto sobre la viga, impide el desarrollo del mecanismo resistente de ésta, entendido a través de la analogía de celosía, ya que la rotura de la cabeza inferior de la viga disminuye la capacidad a tracción del tirante y la rotura del alma impide que se desarrollen las bielas inclinadas y los tirantes verticales a canto completo.

Para dar solución a la problemática anterior se plantea el uso de laminados de FRP adheridos a la fibra inferior de la viga para restituir su capacidad resistente a flexión y de

tejidos o laminados de FRP adheridos al alma de la viga para reforzar la sección frente a esfuerzos cortantes.

La solución de laminados se considera óptima para el refuerzo a flexión de elementos lineales debido a que su disposición exterior da lugar a un brazo mecánico máximo y a su forma uniaxial de trabajo. Por otro lado, en el caso de vigas en doble T, el refuerzo a cortante precisa la ejecución de recrecidos laterales de modo que la sección final a reforzar tenga forma de T, reduciéndose considerablemente el número de aristas de la sección y simplificando la colocación del refuerzo a cortante en el alma, distinguiéndose las siguientes configuraciones:

- Laminados o tejidos anclados por adherencia en las caras laterales de la viga a reforzar.
- Laminados o tejidos en U, anclados por adherencia en las caras laterales de la viga a reforzar.
- Laminados o tejidos eficazmente anclados en las caras superiores de la viga a reforzar (refuerzo envolvente).

Respecto a los refuerzos a cortante, es preciso destacar la relevancia que tiene la configuración del refuerzo a cortante en su eficacia, siendo mayor cuanto mayor sea el canto útil de la sección reparada, por lo que a la hora de diseñar soluciones, se busca maximizar el canto útil de la sección resultante para así obtener la mayor resistencia.

En el caso concreto de puentes de vigas, la losa de compresión impide materializar refuerzos envolventes por lo que generalmente se opta por refuerzos en U, los cuales pueden ir adheridos directamente al alma de la viga o anclados mecánicamente a la cabeza de compresión del sistema. Actualmente, en el mercado existen distintos sistemas para anclarse a la cabeza de compresión de las vigas como por ejemplo el uso de mechas de materiales compuestos o a través de perfiles metálicos anclados a la cabeza de compresión tal y como se esquematizan en la figura 4.

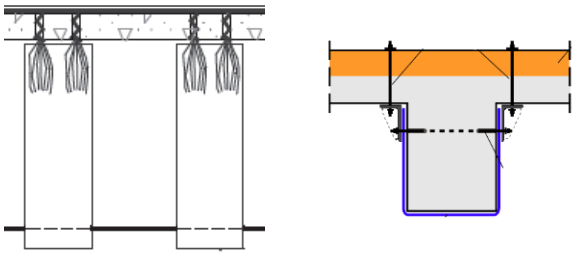


Figura 4. Detalles de anclajes mecánicos.

En el caso de optar por estas soluciones, es preciso que tanto el material de refuerzo como el dispositivo de anclaje procedan del mismo fabricante y el conjunto este avalado por experimentación suficiente o bien por el DIT (Documento de Idoneidad Técnica) emitido por una institución independiente.

3. Base para el diseño de refuerzos con materiales compuestos FRP

Por lo general, en el diseño de estructuras reforzadas con materiales compuestos se aplica la normativa de cálculo relativa al material de referencia. No obstante, el uso de estos materiales implica la aplicación de ciertas correcciones en la formulación de la normativa, adoptándose generalmente las definidas en las distintas guías de diseño, siendo habitual la adopción de los criterios de diseño expuestos en la Guía de Diseño y Ejecución elaborada por el propio CEB-FIP europeo y publicada en su FIB Bulletin 14 [1].

Concretamente, en las reparaciones descritas anteriormente se debe prestar especial atención al control de la delaminación del refuerzo y naturalmente en las comprobaciones relativas al Estado Límite de Agotamiento frente a sollicitaciones normales y frente a cortante.

3.1 Modos de fallo a flexión

Los modos de fallo de un elemento lineal reforzado con materiales compuestos puede clasificarse en dos grupos, aquellos relativos al fallo de la sección actuando como una sección

homogénea provocándose el fallo bien por la compresión del hormigón o bien por la rotura del refuerzo o los que se caracterizan por producirse el fallo entre la unión del refuerzo y el material base. En particular según [1,2] se distinguen los siguientes modos de fallo. Englobados en el primer grupo se tiene:

- Fallo tipo 1 (Figura 5): Fallo por compresión excesiva del hormigón. Se alcanza la resistencia última a flexión por aplastamiento del hormigón comprimido.



Figura 5. Fallo tipo 1.

- Fallo tipo 2 (Figura 6): Fallo por rotura del refuerzo. Se alcanza cuando la tracción en el refuerzo es excesiva provocando su rotura.

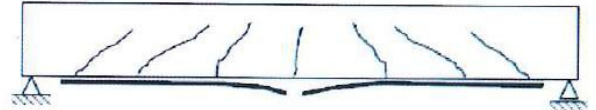


Figura 6. Fallo tipo 2.

Ambos fallos se controlan utilizando el método de los dominios de deformación adaptándolo a los condicionantes específicos de los refuerzos.

- Fallo tipo 3 (Figura 7): Fallo por cortante en el apoyo. Fallo caracterizado por ser una rotura frágil.

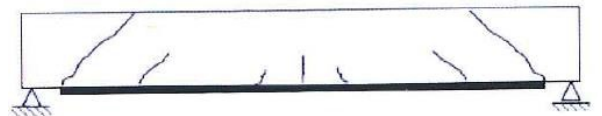


Figura 7. Fallo tipo 3.

- Fallo tipo 4 (Figura 8): Fallo por arrancamiento del hormigón de recubrimiento, en la zona de anclaje del refuerzo. Se produce por la concentración de tensiones cerca de los extremos de los refuerzos. Una vez que la fisura se forma en o cerca del

extremo del refuerzo, ésta se propaga hasta el nivel de la armadura del acero y luego progresa horizontalmente provocando la separación del recubrimiento del hormigón.

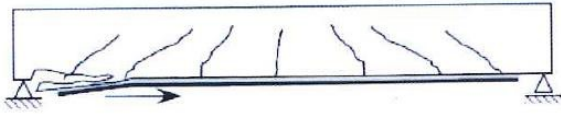


Figura 8. Fallo tipo 4.

El FIB Bulletin 14 [1] propone evitar el arrancamiento y fallo a rasante en la zona de finalización del refuerzo a flexión mediante la aplicación de la analogía de Jansze (1997) [3] basada en el concepto de luz a cortante ficticia.

Por otro lado, el siguiente grupo corresponde a los siguientes modos de fallo:

- Fallo tipo 5 (Figura 9): Fallo por despegue del refuerzo en la zona de anclaje. Debido a las altas tensiones rasantes en el contacto entre el material de refuerzo y el material base, que excede la resistencia del elemento más débil, se produce el despegue entre el adhesivo y la viga.

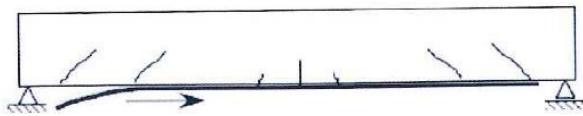


Figura 9. Fallo tipo 5.

- Fallo tipo 6 y 7 (Figuras 10 y 11): Fallo por despegue del refuerzo inducido por fisuras de flexión o cortante. Entre dos fisuras de hormigón se producen elevados esfuerzos rasantes entre el hormigón y el refuerzo pudiendo llegar al despegue si se supera la resistencia, propagándose hacia uno de los extremos.

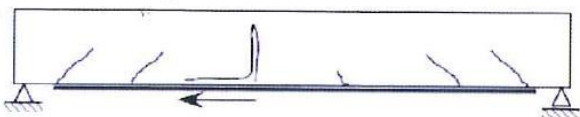


Figura 10. Fallo tipo 6.

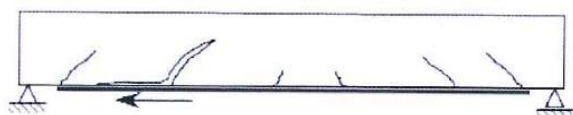


Figura 11. Fallo tipo 7.

Así también, el FIB Bulletin 14 [1] comprueba el modo de fallo 5 y el modo de fallo 6 mediante una metodología basada en la limitación de la deformación admisible en el refuerzo y en la verificación del anclaje extremo a través de los valores de la máxima fuerza que puede ser anclada y la longitud de anclaje necesaria según el modelo de Holzenkämpfer (1994) [4].

Por otro lado, en el caso del modo de fallo 7, la guía establece que se debe controlar comprobando que el cortante aplicado es inferior al que resiste la sección sin armadura a cortante, asumiendo una resistencia a cortante y cuantía longitudinal de armaduras modificada según Blaschko (1997) [5].

3.2 Modos de fallo a cortante

La mayoría de las investigaciones asumen o idealizan los refuerzos a cortante como si se tratasen de armaduras pasivas, asumiendo que la contribución del refuerzo a la resistencia a cortante es igual a la capacidad de las fibras para soportar tracción a una deformación más o menos constante, igual a la deformación última del material () o a un valor reducido. Por tanto, en base a lo anterior, es comúnmente aceptado la aplicación del modelo de cálculo en celosía de Ritter-Morsch, en el cual se considera de aplicación el planteamiento clásico de separar la contribución del hormigón y del acero y en consecuencia de los refuerzos de materiales compuestos, distinguiéndose de esta forma los siguientes modos de fallo:

- Agotamiento de las bielas comprimidas de hormigón.
- Agotamiento por tracción en el alma, el cual, se ve limitado por las características propias del material de refuerzo y por su posible delaminación o fallo de adherencia. Este factor que en muchos casos será el más limitativo en función de la configuración adoptada del refuerzo tal y como se observa en la Figura 12 donde

se representa la contribución a la resistencia a cortante de dos configuraciones distintas y dos hormigones diferentes.[1].

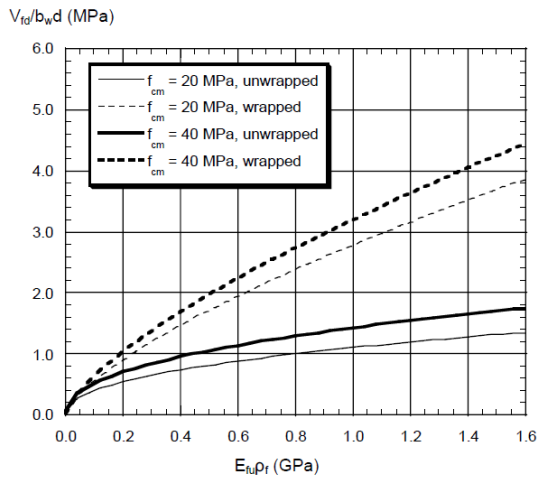


Figura 12. Contribución del refuerzo a la resistencia a cortante para dos tipos de hormigones y configuración.

Se observa que el aumento de la resistencia es limitado a medida que se aumenta la cuantía de refuerzo mientras que la influencia de la calidad del hormigón juega un papel importante en la contribución a la resistencia a cortante para el caso en el que los laminados o tejidos están anclados a ambas caras del elemento o en forma de U (donde el fallo a cortante está gobernado por el despegue del refuerzo). Por otro lado, si se trata de un refuerzo envolvente (en el que el fallo viene gobernado por el fallo por cortante seguido del fallo del material de refuerzo) el aumento de la resistencia a cortante es muy importante quedando en segundo lugar la importancia de la calidad del hormigón.

Por último, es importante conocer la respuesta de fallo a cortante de una pieza reforzada con materiales compuestos, donde se produce primero el fallo de forma prematura por delaminación del material de refuerzo y posteriormente la rotura del refuerzo de FRP una vez se ha deformado considerablemente, coincidiendo el punto de rotura con la carga máxima. Asimismo, también puede producirse

la rotura algo después tal y como se ilustra en Figura 13 [1].

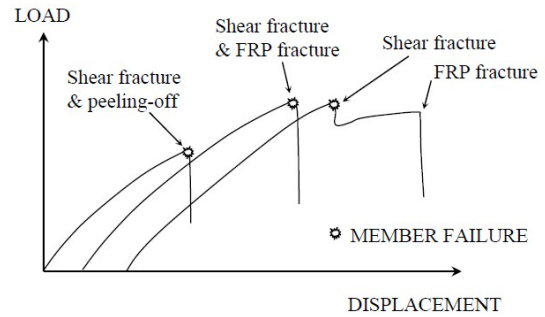


Figura 13. Respuesta esquemática de fallo frente a esfuerzos cortantes.

4. Planteamiento sobre una solución concreta para reforzar vigas frente a esfuerzos cortantes

A continuación se estudia la solución aplicada por LRA Infrastructures Consulting en el marco de las operaciones ejecutadas en la obra de emergencia de reparación de un paso superior dañado por el impacto de un vehículo, concretamente se describe la solución definida en la reparación del paso superior 0A-0005-0022+445 sobre la autovía A-5 en el P.K. 22+445. El contenido, se centrará en el sistema de anclaje utilizado en la solución, a saber, anclaje mediante perfiles metálicos. Asimismo, se introducirá la formulación de cortante aplicada.

4.1 Formulación de cortante

Se expone la formulación a cortante expuesta en la guía de diseño FIB Bulletin 14 [1], siendo dicha formulación compatible con el planteamiento de los eurocódigos, donde la resistencia del elemento es la mínima entre el agotamiento de las bielas comprimidas del hormigón y la tracción del alma.

$$V_{Rd} = \min (V_{cd} + V_{wd} + V_{fd} V_{Rd2}) \quad (1)$$

4.1.1. Agotamiento de las bielas comprimidas de hormigón

El agotamiento se producirá si el esfuerzo cortante efectivo V_{nd} es igual o mayor que la capacidad resistente del hormigón, evaluado a través de V_{n1} según las expresiones definidas en la EHE-08 [6].

4.1.2. Agotamiento por tracción en el alma

El esfuerzo cortante de agotamiento por tracción del alma de la viga puede evaluarse de acuerdo con la expresión:

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su} + V_{fu} \quad (2)$$

Donde la resistencia del hormigón y de la armadura pasiva se calcula de acuerdo a la formulación de EHE-08 [6] y V_{fu} según (3):

$$V_{fu} = 0.9d \frac{n_f A_f E_f \varepsilon_{fu,e}}{S_f \gamma_f} \quad (3)$$

De la expresión anterior hay que prestar especial atención al valor de "d" donde se pueden asumir los siguientes valores según [2]:

$$d_{fe} = d_f - 2 L_A \quad (4)$$

$$d_f - 2 L_A \quad (5)$$

$$d_{fe} = d_f \quad (6)$$

Para las configuraciones de refuerzo en cara laterales, refuerzo en U o envolvente respectivamente, siendo d_{fe} el canto eficaz, d_f el canto útil de la viga y L_A la longitud de anclaje.

Por último, otra de las variables especialmente importante es la deformación de agotamiento último del material compuesto, ya que a través de sus valores, se tiene en cuenta la posible delaminación, suponiendo la pérdida de adherencia entre el refuerzo y el hormigón. Actualmente, no existe aún una formulación completa aceptada internacionalmente sobre los modelos de adherencia, no obstante el FIB Bulletin 14 [1] incluye un conjunto de expresiones empíricas propuestas por

Triatanfillou and Antonopoulus 2000 [7] obtenidas a través de la evaluación y síntesis de resultados experimentales en las que se tiene en cuenta la configuración del refuerzo, siendo las expresiones las siguientes:

- Para refuerzos envolventes con fibra de carbono:

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.3} \varepsilon_{fu} \quad (7)$$

- Para refuerzos en U o en laterales con fibra de carbono:

$$\varepsilon_{f,e} = 0.65 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.56} 10^{-3} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{f,e} = 0.17 \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \rho_f} \right)^{0.3} \varepsilon_{fu} \quad (9)$$

Donde la primera expresión hace referencia al fallo por delaminación y la segunda al de rotura. La deformación última será igual al mínimo entre las dos.

Por otro lado, además establece las siguientes consideraciones adicionales:

- 1) Cuando el efecto de delaminación es dominante en el diseño, se aplica un coeficiente de seguridad adicional de 1.30.
- 2) Cuando se considere crítico el mantenimiento de la integridad del hormigón y el efecto de engranamiento del hormigón, se fija como valor límite de $\varepsilon_{fu,e}$ en el 6 ‰.
- 3) Cuando el refuerzo se realice mediante bandas paralelas, la separación máxima entre ellas se fija en $0.9d - b_f/2$ o $d - h_c - b_f/2$ cuando exista una losa de compresión de espesor h_c .

Por tanto, en función de la formulación anterior, es clara la influencia del canto útil y la deformación de diseño en la resistencia aportada por el refuerzo y por tanto, es imprescindible establecer con criterio sus valores en función del modo de fallo dominante a la hora de definir soluciones.

4.1 Estructura 0A-0005-0022+445 sobre la autovía A-5 en el P.K. 22+445

El ejemplo que nos ocupa se ejecutó en el paso superior 0A-0005-0022+445 sobre la autovía A-5 en el P.K. 22+445 (Figura 14), siendo este un puente de vigas prefabricadas doble T de cuatro vanos, de luces 14+22+22+14 m isostático con continuidad de la losa de compresión sobre pilas intermedias.



Figura 14. Situación de la estructura.

a cortante y quedando descubiertos los torones de pretensado de la cabeza inferior. Además, el impacto provocó una grieta de gran abertura en el alma, de trazado cuasi horizontal, en la fibra superior de unión del alma con la cabeza superior acompañada de fisuración diagonal y quedando al descubierto los cercos de cortante del alma, en los que se observaba su deformación, como consecuencia del giro del alma, siendo un claro indicio de su plastificación (Figura 15).



Figura 15. Detalle de deformación de los cercos.

Concretamente, la pluma de una grúa que se transportaba sobre un camión tipo góndola (gálibo del conjunto 5.07 m) impactó contra la viga de borde del vano situado sobre la calzada central de la A-5 en sentido Badajoz. Dando lugar a la rotura del ala inferior de la viga, en la zona situada sobre el eje del carril derecho de circulación, afectando a los cercos de armado

En función de los daños causados se propuso reparar la viga mediante el recrecido del alma y refuerzo tanto a flexión como a cortante con fibras de carbono. Respecto al refuerzo a cortante, fue preciso diseñar una solución en la cual se maximizaran las prestaciones del material de reparación, ya que en la fase de diseño se asumió conservadoramente una contribución nula de los cercos a la resistencia estructural de la viga. Por tanto, para ello se optó por una solución, mediante la cual se materializará el mayor canto útil posible, consistiendo en reforzar la viga mediante tejidos de FRP en forma de U anclados mecánicamente a la cabeza de compresión de la viga.

En particular, se definió un anclaje mecánico mediante perfiles metálicos anclados químicamente a la cabeza de compresión de la

viga pudiendo así desarrollar un canto útil igual al canto útil de la viga menos la mitad de la longitud de anclaje de los pernos que conectan el angular a la viga (Figura 16). Asimismo, siguiendo las recomendaciones del fabricante, el perfil metálico también fue anclado al alma de la viga obligando de esta forma a disponer el refuerzo a cortante de forma discontinua para evitar su perforación.



Figura 16. Sistema de anclaje del refuerzo a cortante.

Para el diseño del perfil metálico y los pernos de anclaje, se siguieron las recomendaciones del fabricante asumiendo el siguiente mecanismo resistente representado en la Figura 17.

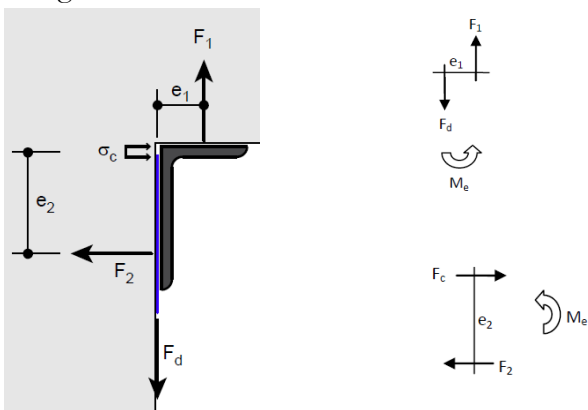


Figura 17. Mecanismo resistente del sistema de anclaje.

Donde:

$$F_1 = F_d \quad (10)$$

$$M_e = F_d e_1 \quad (11)$$

$$F_2 = M_e / e_2 \quad (12)$$

Siendo F_d es el esfuerzo del tejido, F_1 y F_2 el esfuerzo en los pernos, F_c y σ_c la compresión en el hormigón y M_e el momento de excentricidad.

Para finalizar de validar el la propuesta de anclaje se comprobó que el anclaje del tejido al perfil metálico era suficiente para transmitir la máxima fuerza de diseño, asumiendo una adherencia entre el tejido y la chapa igual a la tensión de adherencia del adhesivo epoxi utilizado para pegar el laminado al perfil metálico.

5. Conclusiones

En la presente ponencia se ha pretendido evidenciar los aspectos a tener en cuenta en el diseño de soluciones de refuerzo con materiales compuestos, relativos a los principios de funcionamiento y modos de fallo de los refuerzos. Destacándose que para garantizar el éxito de las soluciones es imprescindible:

- Conocer y entender los modos de fallo asociados a los tipos de refuerzo.
- Utilizar sistemas contrastados y validados que dispongan de los correspondientes documentos técnicos de idoneidad (DIT), que aporten la información necesaria y complementaria para el diseño.
- El trabajo conjunto entre el proyectista y los departamentos técnicos de los fabricantes, para así conocer las particularidades del sistema y maximizar las soluciones proyectadas, en cuanto aportan la información relativa al sistema validada por su experiencia.

Referencias

- [1] Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, FIB Bulletin 14 Externally bonded FRP reinforcement for RC

structures, July 2001.

- [2] Grupo de Trabajo: Refuerzo con materiales compuestos en puentes de hormigón, Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras, Refuerzos con materiales compuestos en puentes de hormigón, 2017.
- [3] Jansze, W. (1997), Strengthening of reinforced concrete members in bending by externally bonded steel plates. PhD dissertation, TU Delft, The Netherlands.
- [4] Holzenkämpfer, P. (1994), Ingenieurmodelle des verbundes geklebter bewehrung für betonbauteile. Dissertation, TU Braunschweig (In German).
- [5] Blaschko, M. (1997), Strengthening with CFRP. Münchner Massivbau Seminar, TU München (In German).
- [6] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [7] Triantafillou, T. C. and Antonopoulos, C. P. (2000), Design of concrete flexural members strengthened in shear with FRP. ASCE Journal of Composites for Construction, 4(4), 198-205.