

ANÁLISIS DE REFUERZO DE PERFILES CON CFRP MEDIANTE UNIONES ABULONADAS

Díaz Maimone, David Eliel; Godoy, María Laura
Ingenieros Civiles

Área de Estructuras, Depto. Ing. Civil y Agrimensura, Facultad de Ingeniería, UNICEN.
david.diaz@fio.unicen.edu.ar; mgodoy@fio.unicen.edu.ar

RESUMEN

Las propiedades de los materiales compuestos tales como: gran relación resistencia/peso, durabilidad, resistencia a la abrasión, corrosión y temperatura son aspectos que no pueden ser ignorados y son ventajas frente a otros materiales. En aplicaciones civiles, se han utilizado como refuerzos de estructuras sometidas a flexión, siempre asegurando la correcta transmisión de esfuerzos de un material a otro mediante una buena ejecución de su unión. Las uniones de tipo mecánica permiten la colocación in situ, no requieren preparación de la superficie, son fáciles de desarmar para inspección o cambio, y no son afectadas por las condiciones climáticas, a diferencia de las uniones pegadas, que a su vez fallan catastróficamente.

En el presente trabajo se proponen diferentes maneras de reforzar una viga con material compuesto, a fin de mejorar su capacidad a la flexión. El refuerzo se realiza mediante una unión mecánica, realizando un análisis numérico a un perfil IPN 200 simplemente apoyado y sometido a una carga uniformemente repartida. Entre las propuestas se varía el espesor y largo del refuerzo y la cantidad de bulones.

ABSTRACT

The properties of composite materials such as: great strength/weight ratio, durability, thermal, corrosion and abrasion resistance, are aspects that cannot be ignored and are advantages over known materials. They have been used as reinforcements for structures subjected to bending, always ensuring the correct transmission of stress from one material to another through good execution of their union. Mechanical joints allow in-situ placement, and require no surface preparation, are easy to disassemble for inspection or replacement, and are not affected by weather conditions, unlike bonded joints, which themselves fail catastrophically.

In this work, different ways are proposed to reinforce a beam with composite material, in order to improve its bending capacity. The reinforcement is carried out through a mechanical union, performing a numerical analysis to an IPN 200 profile simply supported and subjected to a uniformly distributed load. Among the proposals, the thickness and length of the reinforcement and the number of bolts vary.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Materiales como el cemento, el acero y madera son los denominados materiales tradicionales utilizados en la construcción durante los últimos 100 años. El polímero de fibra de carbono (FRP) es un material relativamente nuevo, cuyos primeros usos datan de hace 50 años en lo que respecta a puentes y edificios. Sin embargo, desde los años 30's se ha utilizado en la industria espacial y automotriz. En Figura 1 se muestran aplicaciones civiles y automotriz. Este material, compuesto de fibras y resina, donde la fibra aporta la resistencia y la resina permite la distribución de esfuerzos, es un material que otorga grandes resistencias y bajo peso e incluso resistencia a la corrosión¹.



Figura 1. Aplicaciones de la fibra de carbono

En aplicaciones civiles, el FRP puede encontrarse en estructuras completamente hechas de este material, en barras o en refuerzos.

Existen trabajos que han investigado el refuerzo en vigas mediante la aplicación de FRP. Entre los mismos se pueden mencionar un estudio solo experimental de vigas reforzadas con FRP² pretensando el refuerzo. Otros investigadores³ han realizado un estudio experimental con los refuerzos dispuestos de manera diferente a lo propuesto en este trabajo. Otros estudios también han realizado un estudio experimental de un refuerzo de viga, donde los bulones no perforan el FRP debido a que pasan por el costado y la transmisión se realiza por fricción gracias al apriete de los bulones en estructuras auxiliares⁴. Es posible mencionar el estudio numérico y experimental con carbono de diferentes módulos de elasticidad⁵ donde en el análisis numérico modelan el FRP como material isotrópico lo cual es un planteo diferente. En dicho estudio no se detalla el modelado de las uniones y se emplean elementos bidimensionales y no tridimensionales como en este trabajo.

El presente trabajo tiene como objetivo estudiar numéricamente una viga de perfil de acero IPN para diferentes propuestas de refuerzo y compararla con la misma sin reforzar. Dicho refuerzo está vinculado al perfil mediante una unión abulonada, por lo que es necesario asegurar la correcta transmisión de los esfuerzos sin romper la unión.

Se obtienen para cada modelo analizado la carga que provoca la falla de la estructura, con el empleo de diferentes criterios, como son: Von Mises, fluencia o rotura del refuerzo, y la flecha en el centro del vano, y se comparan dichos valores con la carga de fluencia en el perfil sin reforzar y con la flecha admisible de la reglamentación argentina CIRSOC. Se analiza también la sollicitación en los bulones.

Organiza:

MODELOS ANALIZADOS

Descripción del problema

El estudio consiste en una viga simplemente apoyada de 2 metros de longitud reforzada con fibra de carbono mediante uniones abulonadas. La sección transversal es un perfil de acero IPN 200. La carga se distribuye uniformemente en su longitud. Figura 2.

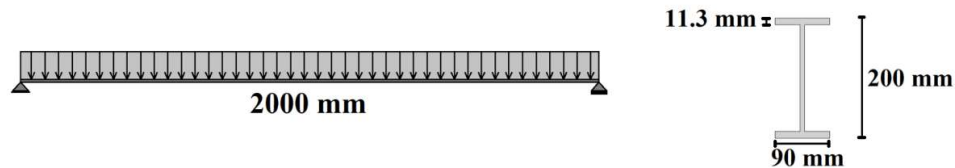


Figura 2. Esquema y sección transversal del perfil

Las propiedades mecánicas de los materiales se resumen en la Tabla 1 para el acero y en la Tabla 2 para el material compuesto. Para el carbono se considera como la acción conjunta de láminas apiladas. Estas láminas son material que se considera ortotrópico. se listan las propiedades de rotura según el criterio Hashing para todas las láminas que conforman el laminado. Para el acero se considera el material isótropo y de comportamiento elástico-bilineal. El bulón es de alta resistencia cuya resistencia a la fluencia es 1100 MPa.

Propiedad mecánica de FRP	Lámina
Módulo de elasticidad E_x (MPa)	145000
Módulo de elasticidad E_y (MPa)	10300
Módulo al cortante G_{xy} (MPa)	5300
Módulo al cortante G_{xz} (MPa)	5270
Módulo al cortante G_{yz} (MPa)	3950
Coefficiente de Poisson ν_{xy}	0.3
Rotura a tracción longitudinal X_t (MPa)	2250
Rotura a compresión longitudinal X_c (MPa)	1600
Rotura a tracción transversal Y_t (MPa)	64
Rotura a compresión transversal Y_c (MPa)	290
Rotura al cortante S_{xy} (MPa)	120

Tabla 1 – Propiedades mecánicas para la lámina y laminado de fibra de carbono
 Organiza:

Propiedad mecánica	Acero
Módulo de elasticidad E (MPa)	210000
Coefficiente de Poisson ν_{xy}	0.3
Tensión de Fluencia	240

Tabla 2 – Propiedades mecánicas para el acero

El refuerzo de carbono tiene una secuencia de apilamiento de tipo $[0,45,-45,90]_{8s}$ para los refuerzos de 8 mm y el $[0,45,-45,90]_{16s}$ para los de 16 mm.

Se analizan cinco propuestas de refuerzo, los cuales se detallan en el siguiente apartado. En cada uno se varía la geometría del refuerzo considerando largo y espesor, también se cambia la cantidad de bulones.

El diámetro de los bulones utilizados es de 6 mm en unos modelos y de 8 mm en otro. Cada perforación verifica las dimensiones recomendadas por ASTM 5961 al aplastamiento⁶. La distancia de cada perforación a cualquier borde es de 18 mm y entre bulones de 36 mm.

Propuestas de refuerzo

Se proponen cinco maneras diferentes para resolver el refuerzo:

La primera consiste en un refuerzo en el vano central de la viga, en correspondencia con los mayores momentos flectores, el mismo tiene un espesor de 16 mm y consta de 128 láminas. El refuerzo está sujeto en los dos extremos con un total de 20 bulones, es decir 10 para cada extremo. El diámetro de los mismos es de 8 mm. Por ende, para cubrir las especificaciones de la norma, es necesario ensanchar un poco el refuerzo, quedando unos milímetros sobresaliendo del filo del ala.

La segunda propuesta consiste en un refuerzo que también cubre solo el vano central de 1 metro. En esta ocasión el espesor del refuerzo es de 8 mm por lo que consta de 64 láminas. Para esta sujeción se proponen 16 bulones en total, es decir 8 por cada extremo, con un diámetro de 6 mm.

La tercera propuesta consiste en mantener el espesor de 8 mm en el vano central, pero reforzar la sujeción con un total de 20 bulones, 10 para cada extremo. Se diferencia de la primera en que aquí los bulones son de 6 mm de diámetro. Además, el ancho coincide con el ancho del ala.

La cuarta propuesta consiste en reforzar toda la luz de la viga. Sujetando el refuerzo con un total de 16 bulones, es decir 8 para cada extremo. El espesor del mismo es de 8 mm. Los bulones son de 6 mm de diámetro.

Por último, la quinta propuesta consiste en reforzar la anterior con una banda de material compuesto en la parte superior del alma, en ambas caras. El refuerzo tiene 36 mm de ancho y 8 mm de espesor. Está sujeto con bulones en los extremos y a

50 cm de los mismos, completando un total de 4 bulones.

Los esquemas de las cinco propuestas se muestran en la Figura 3 y se resumen en la Tabla 3.

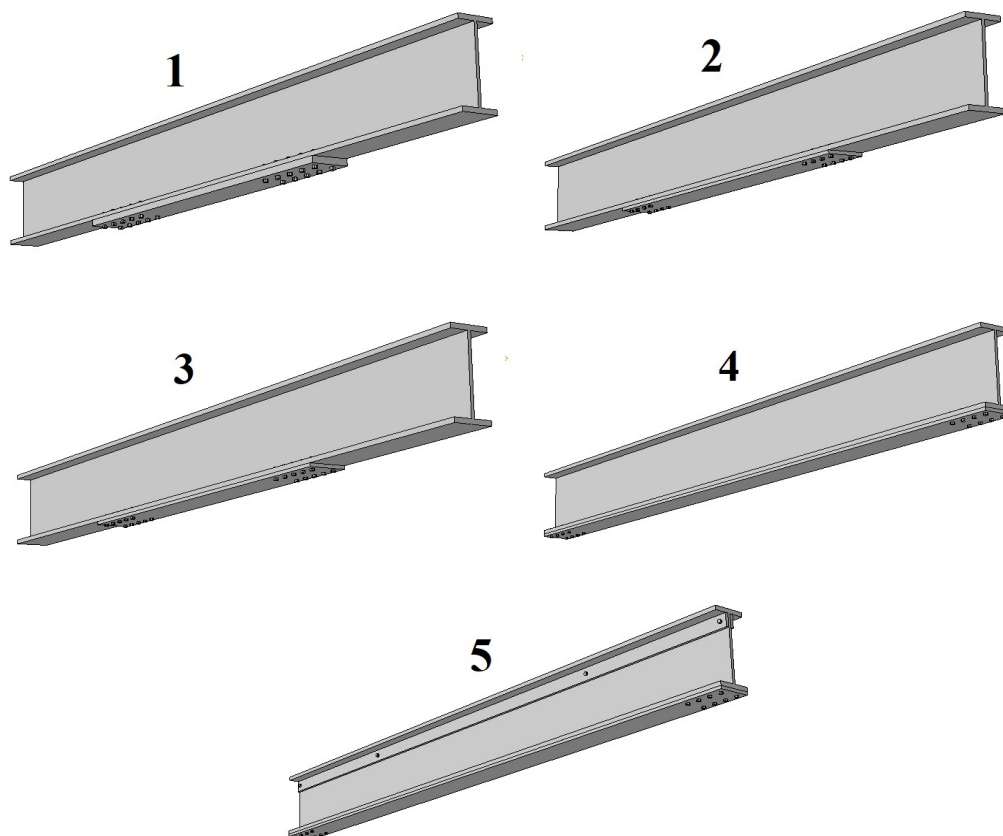


Figura 3. Propuestas de refuerzo

Propuesta	N° bulones	Diámetro bulones	Largo refuerzo	Ancho refuerzo	Grosor refuerzo
1	20	8	1 m	96 mm	16 mm
2	16	6	1 m	90 mm	8 mm
3	20	6	1 m	90 mm	8 mm
4	16	6	2 m	90 mm	8 mm
5	16 (ala) 4 (alma)	6	2 m	90 mm (ala) 36 mm(alma)	8 mm

Tabla 3 – Resumen de las propuestas

Organiza:

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Todas las propuestas son comparadas con la carga de fluencia que tiene el perfil sin reforzar. La misma es de 21814 Kg, encontrada numéricamente.

La flecha límite según reglamento CIRSOC (Tabla A-L.4.1) es de 8 mm.

Para la primera propuesta la carga que produce la rotura de la estructura, entendiendo por tal que la misma ya no cumple las condiciones para la que fue proyectada, es de 6783 Kg. Es decir, menor que la del perfil sin reforzar. La flecha en este instante es de 1,4 mm. La falla se debe a la concentración de tensiones que se produce en los agujeros de la unión.

Para la segunda propuesta la carga que produce la rotura de la estructura es de 15750 Kg. También menor que la del perfil sin reforzar. La flecha en este instante es de 3,4 mm. La rotura se debe también a la concentración de tensiones que se produce en los agujeros de la unión.

Para la tercera propuesta la carga que produce la rotura de la estructura es de 17400 Kg. También menor que la del perfil sin reforzar. La flecha en este instante es de 3,9 mm. La rotura se debe también a la concentración de tensiones que se produce en los agujeros de la unión.

Para la cuarta propuesta la carga que produce la rotura de la estructura es de 22250 Kg. En esta situación, la viga admite una carga un 2% mayor que la del perfil sin reforzar. La flecha en este instante es de 4,8 mm. La rotura se debe a las tensiones de compresión que ocurren en el ala superior, en el centro del vano.

Para la quinta propuesta la carga que produce la rotura de la estructura es de 23375 Kg. En esta situación, la viga admite una carga un 7,2% mayor que la del perfil sin reforzar. La flecha en este instante es de 5 mm. La rotura se debe a las tensiones de compresión y también de tracción que ocurren en el ala superior e inferior respectivamente, en el centro del vano.

Para las primeras tres propuestas es notable destacar que la viga está siendo reforzada en el vano central, donde el momento es mayor, y además en el ala inferior, donde las tensiones son mayores. Por más que se cambie el diámetro de los agujeros, o se aumente la cantidad de bulones para repartir la fuerza en los mismos, la concentración de tensiones es inevitable. La ventaja de estas propuestas radicó en reforzar donde el momento es mayor y no en toda la longitud, con el consecuente ahorro de material.

Para la cuarta y quinta propuesta, donde se pone el refuerzo en toda la longitud, siendo un poco más considerable la cantidad de material que se agrega respecto a las propuestas anteriores, la ventaja es que se colocan los bulones donde no hay tensiones de importancia. El momento es pequeño cerca de los apoyos. Del análisis de la cuarta propuesta surge que la cabeza de compresión es la que termina limitando la resistencia de la viga, por lo que, si no se refuerza de una manera equilibrada, es decir arriba y abajo, los refuerzos no serán muy efectivos.

Organiza:

Esta situación puede evitarse pretensando el refuerzo. Es un método que relaja la cabeza de compresión a costa de tensionar el refuerzo, ya que este material trabaja muy bien a la tracción. El hecho es que el procedimiento es laborioso, y tiene que ser llevado a cabo por un equipo especializado. El riesgo que se relaje el pretensado existe y hace que el sistema pierda seguridad.

La quinta propuesta elimina el desequilibrio de resistencias entre ambas alas. A su vez, la distancia entre bulones en el refuerzo superior asegura que no se produzca pandeo porque corta la esbeltez del mismo. Esta propuesta permite aumentar la carga de rotura en un porcentaje que resulta ser considerable teniendo en cuenta que el incremento de cargas en una estructura vieja que reciba más tránsito de personas o vehículos, o que cambie de destino, puede alcanzar ese orden de magnitud.

En todas las propuestas las flechas son menores que las admisibles por reglamento.

En cuanto al refuerzo, en ningún caso se alcanzaron las fallas bajo el criterio correspondiente.

Respecto de los bulones, tampoco fallaron bajo ningún tipo de sollicitación.

Todos los resultados comentados se resumen en la Tabla 4.

La tabla muestra los resultados comparándolos con la carga al comienzo de la fluencia en la viga sin reforzar y la flecha admisible según reglamento CIRSOC. Como se mencionó anteriormente las mismas eran de 21814 N y 8 mm respectivamente.

Propuesta	Carga de rotura (Kg)	Porcentaje de mejora	Flecha (mm)
1	6783	disminuye	1,4
2	15750	disminuye	3,4
3	17400	disminuye	3,9
4	22250	2 %	4,8
5	23375	7,2 %	5

Tabla 4 – Resumen de resultados

Es posible ver en la Figura 4 las deformadas, ampliadas a una escala de cinco veces, y también se puede observar con color verde o rojo los puntos donde el acero ha fallado. Es posible observar en las primeras tres propuestas que la primera falla ocurre en las cercanías de los agujeros, y luego al seguir cargando la pieza, la cabeza de compresión. Luego de esto, la cabeza a tracción. Es posible notar también la diferencia de área que toma la falla en compresión respecto a la tracción, poniendo en evidencia el desbalance de distribución de esfuerzos.

Se observa que, en las dos últimas propuestas, la falla no ocurre en las cercanías de

Organiza:

los agujeros. En la cuarta propuesta se mantiene el desbalance comentado entre la compresión y tracción, sin embargo, no sucede en la última propuesta. En la quinta propuesta el área pintada en rojo es igual arriba y abajo, poniendo en evidencia la misma colaboración de la cabeza a tracción y la cabeza a la compresión.

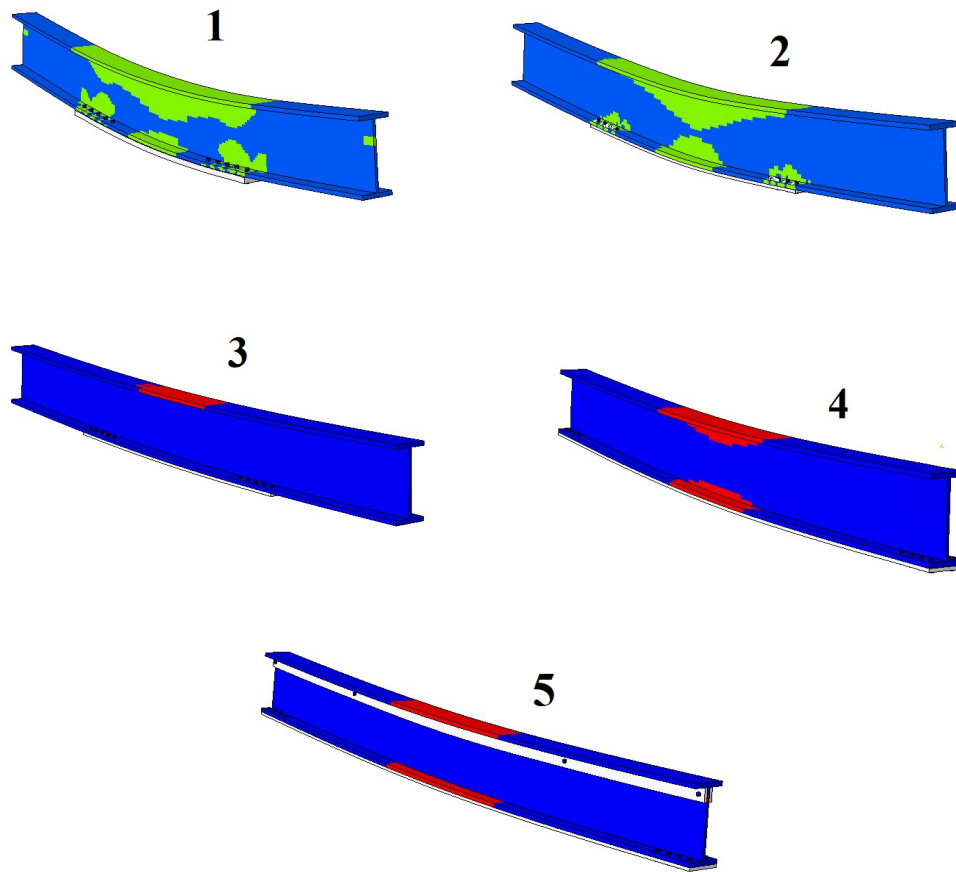


Figura 4. Deformadas y zonas de fallas

CONCLUSIONES

Ha sido llevado a cabo el estudio de refuerzo de un perfil de acero con material compuesto unido mediante bulones y ha permitido realizar las siguientes conclusiones:

- La simulación numérica abre un espacio de posibilidades, funcionando como laboratorio virtual que permite eliminar propuestas mal diseñadas o mejorarlas antes de ser llevadas a cabo de manera física.

Organiza:

- El refuerzo de la viga mediante uniones no es tan sencillo como parece. Reforzar lleva consigo muchos detalles que a simple vista quizás degraden la viga y produzcan el efecto contrario si no se cuenta con un buen diseño.
- Reforzar la viga en el vano central, para este caso, es perjudicial independientemente del grosor o cantidad y tamaño de bulones porque la concentración de tensiones afecta en gran medida.
- Es mejor reforzar la viga en los extremos, donde las tensiones son menores y además por geometría, el refuerzo restringe en parte la deflexión, acompañando la misma. Caso contrario al colocar refuerzo en la parte inferior del alma, hay que poner bulones en la parte central para que acompañen la deflexión, originando el mismo perjuicio que el indicado en el ítem anterior.
- Es importante que la distribución de esfuerzos sea la adecuada para no gastar material innecesariamente, es decir, un mejor aprovechamiento del mismo. En este caso se ha logrado reforzando arriba y abajo.

LÍNEAS FUTURAS

El equipo de trabajo se encuentra estudiando el análisis de este tipo de refuerzos, pero de manera pretensada, logrando un aprovechamiento del material compuesto que trabaja mejor a este esfuerzo. El pretensado permitirá compensar el faltante de refuerzo en la cara superior y disminuiría el trabajo a tracción de la viga.

A su vez, el estudio incluye la holgura de los agujeros y el ajuste de los bulones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Qureshi, J. (2022). A review of fibre reinforced polymer structures. Londres, Reino Unido: Fibers 2022, 10, 27. University of East London
- [2] Tomasz W. Siwowsky, P. S. (2018). Experimental study on CFRP-strengthened steel beams. Polonia: Rzeszow University of Technology, Al.Powstancow Warszawy 12, 35-959, Composites Part B.
- [3] Eshagh Katrizadeh, K. N. (2019). Experimental study on failure modes of MF-CFRP strengthened steel beams. Islamic Azad University, Zahedan, Irán: Department of Civil Engineering, Zahedan Branch, Journal of Constructional Steel Research.
- [4] Junhui Li, Y. W. (2018). Experimental study on the flexural behaviour of notched steel beams strengthened by prestressed CFRP plate with an end plate anchorage system. Engineering Structures 171 (2018) 29–39.
- [5] Elyas Ghafoori, M. M. (2015). Normal, high and ultra-high modulus carbon fiber-reinforced polymer laminates for bonded and un-bonded strengthening of steel beams. University of Tehran, Iran: Materials and Design 67, 232–243.
- [6] ASTM 5961 . (2017). Standard Test Method for Bearing Response of Polymer Matrix Composite Laminates.

Organiza: