

# CONSIDERACIONES RESPECTO AL CÁLCULO DE EMPALMES ATORNILLADOS DE PERFILES ESTRUCTURALES DE GFRP SOMETIDOS A FLEXIÓN

(CONSIDERATIONS ON THE CALCULATION OF BOLTED JOINTS OF GFRP STRUCTURAL PROFILES SUBJECTED TO BENDING)

J. Tomás San-José<sup>(\*)</sup>, Eduardo Serna<sup>(\*)</sup>

<sup>(\*)</sup>Labein, Centro Tecnológico

Fecha de recepción: 10-VI-03

ESPAÑA

400-39

## RESUMEN

*Se entiende como material compuesto la combinación de dos o más materiales para obtener un nuevo producto que mejore las propiedades individuales de cada uno ellos. Se está comenzando a emplear el material compuesto, formado por una matriz de tipo polimérico o resina reforzada con fibras, como elementos estructurales, pero con reticencias originadas por las incertidumbres existentes en la actualidad relativas a su resistencia, deformabilidad y durabilidad. Este material aporta un importante interés cuando se quieren obtener elementos estructurales de alta resistencia, protección frente a ataques químicos y ligereza, utilizando perfiles a la manera de la estructura metálica, fabricados por pultrusión.*

*Debido a que el punto crítico estructural se encuentra en las uniones, el presente artículo se centrará en los empalmes atornillados con cubrejuntas de alas de perfiles pultruidos IPN, describiendo los ensayos de diferente naturaleza realizados en las instalaciones del Centro Tecnológico LABEIN. A su vez se recogen los ensayos previos desarrollados para analizar la viabilidad de ejecutar uniones por rozamiento con tornillos de alta resistencia.*

## SUMMARY

*A composite material can be defined as the combination of two or more materials with the aim of obtaining a new product with improved properties. Composite materials, composed of a polymer matrix reinforced with fibers, are currently used as structural elements, in spite of the uncertainties on strength, deformability and durability. The use of pultruded profiles in shapes similar to those used in metallic construction, results in an interesting solution for this material when high resistance, protection against chemical attacks and lightness are required.*

*The structural key point of those materials are the joints. The present paper is focused on joints composed of bolted plates on the wings of IPN pultruded profiles. Different tests conducted in LABEIN are described. Likewise, this paper deals with tests carried out with the purpose of analysing the feasibility of joints with high resistance bolts.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Se entiende como material compuesto la combinación de dos o más materiales para obtener un nuevo producto que mejore las propiedades individuales de cada uno ellos. Los materiales compuestos avanzados están formados por una matriz de tipo polimérico o resina que configura geoméricamente el material compuesto, reforzada con fibras sintéticas (vidrio, aramida y carbono principalmente) que aportan rigidez y resistencia. En ingeniería y arquitectura se utilizan frecuentemente como componentes no estructurales, pero donde tiene más justificación el empleo de fibras de elevadas prestaciones es en las aplicaciones estructurales. Una utilización típica es la de refuerzo de estructuras por medio de la adhesión de bandas rígidas de polímero y fibra, y un uso incipiente es el de servir de armaduras no metálicas dentro de hormigón como sustitución de las armaduras de acero que conlleva el problema de corrosión.

Pero a lo que nos vamos a referir en el presente artículo es a otra forma de uso de este material, utilizado como perfiles a la manera de la estructura metálica, fabricados por pultrusión, que son contemplados con interés cuando se quiere alta resistencia, resistencia química y ligereza en algunos tipos de estructuras. Al igual que en estructura metálica, con estos materiales la clave es el diseño de las uniones, cuyas posibilidades se reducen a la solución atornillada y/o pegada, con la dificultad añadida de la anisotropía del material por la dirección longitudinal de las fibras. La solución con adhesivo sería la más conveniente por el aprovechamiento total de la sección y el buen reparto de esfuerzos, pero el riesgo de comportamiento frágil a que pueden conducir las uniones adhesivas puras conduce a las uniones atornilladas o a la combinación de adhesivo y tornillos.

En general el diseño con estos perfiles estructurales presenta incertidumbres y dificultades, pues además de un

precio no competitivo, no hay especificaciones aceptadas internacionalmente ni códigos de diseño oficiales que definan la seguridad. Por ello se suele acudir a las guías de diseño de los fabricantes de los perfiles.

De los diferentes tipos de unión presentes en el ámbito de los materiales compuestos: uniones para estructuras mixtas, enlaces perpendiculares o en ángulo, nudos de celosías o empalmes, el presente artículo se centrará en los empalmes atornillados con cubrejuntas de alas de perfiles pultruidos IPN. También se han hecho unos ensayos previos para analizar la viabilidad de ejecutar uniones por rozamiento con tornillos de alta resistencia.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. Materiales compuestos

Los materiales compuestos son de uso habitual en campos tales como aeronáutica, náutica o automoción [1]. Por el contrario, su aplicación en la construcción es mucho más limitada, siendo difícil sustituir los materiales tradicionalmente empleados (acero y hormigón, en general), principalmente por el desconocimiento y la desconfianza que provocan.

A este respecto, la tipología estructural en la que mayormente se está planteando la aplicación de los materiales compuestos, son las estructuras de puentes. En dicho ámbito, se están diseñando, construyendo y monitorizando estructuras de puentes ejecutadas total o parcialmente, en materiales compuestos. Este segundo caso está siendo muy común [2] ya que permite realizar las reparaciones de puentes (coflictivos por densidad de tráfico y difícil accesibilidad) por sustitución de los tableros tradicionales (hormigón, acero o mixtos) por otros en materiales compuestos. En este caso primarían aspectos tales como su alta durabilidad, en zonas de condiciones ambientales agresivas, y gran ligereza que permita una reparación rápida y a precios competitivos.

Actualmente, en el ámbito de las nuevas estructuras de puentes en materiales compuestos, se están ejecutando varias obras para pasarelas peatonales, e incluso tráfico rodado [3] que hacen augurar un interesante futuro para este material en la obra civil. También, incluso, en las obras de edificación e industriales en aplicaciones concretas, toda vez que se solucionen una serie de cuestiones relacionadas con aspectos tales como: coeficientes de seguridad, geometrías de perfilera, uniones dúctiles, deformabilidad y comportamiento dinámico, que requieren seguir avanzando simultáneamente por la vía analítica y experimental. Todo ello dentro de un marco de viabilidad técnica y económica que asuma los criterios de sostenibilidad [4].

En general, la metodología de cálculo de estos materiales no difiere, de manera importante, respecto de los tradicio-

nales, salvo en aspectos diferenciados de su naturaleza (mayor ligereza, durabilidad, fragilidad y deformabilidad) que supondrán incorporar una serie de matices [5]. Sin haberse establecido todavía un método de estudio unificado, se están llevando a cabo importantes avances en la creación de un cuerpo único de cálculo, hasta donde la flexibilidad de composición y comportamiento de los materiales compuestos lo permita [6] [7].

### 2.2. Tipologías estructurales

Dentro del ámbito de los materiales para la construcción, también podría hablarse de dos tipologías básicas de estructuras compuestas, atendiendo a sus dimensiones: estructuras de elementos superficiales y de elementos lineales.

Las primeras están basadas en elementos mixtos (hormigón con laminado grecado de FRP) (fibre reinforced polymer), por ejemplo, o en los sistemas sándwich. Estos últimos están diseñados para proporcionar, con una óptima relación resistencia/peso, facilidad de ensamblaje y simplicidad de formas, impermeabilidad, razonable resistencia al fuego, un buen aislamiento térmico y absorción del ruido. Este tipo de estructuras está orientado al diseño de suelos (adición de nervaduras, mayores espesores, etc.), cerramientos (caso de divisiones interiores o paramentos exteriores), cubriciones (caso de la placa sólida de material compuesto con curvaturas adecuadas y las estructuras sandwich). En todas ellas podría contemplarse, por ejemplo, su plegabilidad gracias a propiedades tales como la moldeabilidad, repetibilidad de formas y estabilidad dimensional del composite. Es posible considerar el proceso de prefabricación, lo cual, permitiría conseguir una mayor sencillez de uniones entre diferentes componentes, alto nivel de estandarización, buenas relaciones de resistencia frente a peso, portabilidad y puesta en obra.

Las estructuras basadas en elementos lineales se fundamentan en perfilera abierta, cerrada, plana y maciza. Tendríamos estructuras orientadas al diseño de pórticos siendo una buena solución la integración de perfiles de diferentes geometrías, e incluso, materiales. Orientadas al diseño de celosías, de modo que se organicen los elementos cuidando las inestabilidades de los perfiles comprimidos y con encuentros de los elementos en cartelas o en nudos prefabricados que los "abracen", proporcionando simplicidad y rapidez en el montaje. Como en el caso de las estructuras superficiales, sería interesante contemplar su plegabilidad (necesidad de incorporar nudos desmontables) y otros con efecto pasador (bulonado).

### 2.3. Uniones. Caso específico de uniones adhesivas

Como ocurre tradicionalmente, uno de los puntos clave para el correcto funcionamiento de las estructuras composite son las uniones. En principio, los materiales

compuestos admiten diferentes métodos de unión, en general, los mismos que los materiales tradicionales (excepto la soldadura, por supuesto).

Sin embargo, la combinación de adhesivos y tornillería en una misma unión será muy común por motivos de seguridad, a la vista del comportamiento frágil a que pueden conducir las uniones adhesivas puras. Dejando aparte esta seguridad supletoria, interesa analizar las posibilidades de las uniones atornilladas puras, aprovechando el conocimiento que de ellas se tienen en las estructuras metálicas.

A posteriori, una vez conocida la rigidez que estas uniones mecánicas aportan, se podría evaluar, en investigaciones futuras, la seguridad supletoria de simultalearlas con uniones químicas (tipo adhesivo).

Por lo tanto, antes de abordar el objeto del presente estudio sobre uniones atornilladas, se realizará una breve mención al estado de la cuestión en lo que a uniones adhesivas se refiere. Entre los motivos que han llevado a sopesar su utilización, destaca el de ser más ventajosas respecto a las atornilladas en el sentido de conseguir uniones con un menor nivel de carga, debido a un reparto de ésta de manera más uniforme y eficiente. De tal modo que constituyen referencia obligada en el caso de que, o bien los niveles de carga queden lejos del límite de fallo por cortadura del adhesivo, o esté permitido trabajar con unos coeficientes de seguridad suficientemente elevados.

Otra de las grandes ventajas que presentan las uniones adhesivas, es la posibilidad de realizar uniones con diferentes tipos de materiales, únicamente seleccionando el tipo de adhesivo adecuado. Este es el caso de que exista la necesidad de unir aceros con plásticos o materiales basados en fibras, es decir, materiales que ya sea por que presentan diferencias elevadas en rigidez entre sí o por la propia estructura interna del material, se presuponen poco favorables para la ejecución de uniones mecánicas debido a la aparición de concentraciones de tensiones perjudiciales. De otra parte, presentan una clara desventaja respecto a su dificultad inherente para su desmontabilidad (no tan obvia en el caso de estructuras de tipo permanente).

Otras utilizaciones recomendadas en diversa bibliografía para este tipo de uniones, por su efectividad, se refieren al refuerzo de uniones atornilladas, finalizadas mediante adhesivo para incrementar su rigidez. Propiamente dicho no se trata de soluciones de tipo adhesivo, pero su utilización permite reducir el efecto pernicioso que suponen las concentraciones de tensiones, por evitar la inclusión de mayor número de elementos de unión.

Es claro que, en las uniones adhesivas "puras" el área efectiva de adhesión depende directamente la resistencia a cortadura de la unión, y se puede asegurar que lo hace linealmente a través de las fórmulas de la Teoría de Resistencia de Materiales. También será clave el efecto de la

variación en el espesor del adhesivo o el estudio tribológico del estado superficial de los diferentes materiales utilizados como adherentes y su capacidad de mojado por parte del adhesivo.

Estos efectos podrían traducirse en la definición de una constante que modifique los resultados de los valores resistentes obtenidos para un caso tomado como normalizado, después de la experimentación de caracterización pertinente. Considerar la direccionalidad de los esfuerzos aplicados en la unión incrementaría la dificultad en la determinación teórica de la carga de fallo.

En lo referente a la durabilidad de las uniones adhesivas, se ha comprobado que el estudio de durabilidad de las uniones y la mejora de su comportamiento mecánico, gracias a la mejora técnica de adhesivos y procesos de preparación superficial de los adherentes, es un campo con reducido margen de investigación en estos momentos. Esto es debido a que depende, sobre todo, de técnicas adoptadas de otros procesos de fabricación, así como de la continua renovación de productos, casi siempre hablando de adhesivos, que los fabricantes lanzan al mercado.

Sin embargo, se muestra mucho más fecundo el campo del diseño de uniones adhesivas específicas a un nivel y tipo de cargas, que consideren su característica más determinante:

- Aumento de la superficie de contacto entre adherentes y relación de contacto entre materiales, con el fin de conseguir un mejor reparto de los esfuerzos.
- Optimización de la forma de trabajo de la unión.

Otra carencia que se ha identificado al abordar el estado del arte de este tipo de uniones, es la disponibilidad de valores de coeficientes de seguridad normalizados o aplicables con la suficiente fiabilidad al cálculo de uniones.

### 3. EXPERIMENTACIÓN SOBRE EMPALMES ATORNILLADOS

#### 3.1. Método experimental

A la hora de abordar el estudio experimental con perfiles GFRP, con el propósito de diseñar y ejecutar ensayos, hay que tener presente la anisotropía del material. A este respecto, tanto la configuración como la instrumentación del experimento son puntos clave. Por ejemplo, debe plantearse con sumo cuidado la forma de la aplicación de las cargas en lo que a posibles aplastamientos (bajo cargas concentradas) o inestabilidades locales (desviaciones del punto de aplicación) se refiere. Una consecuencia de la inestabilidad es que los perfiles de GFRP abiertos ensayados a flexión necesitan de sistemas de guiado para evitar el pandeo lateral, cuando nos situamos en magnitudes de carga avanzadas. Este aspecto complica el ensayo pero

resulta imprescindible de cara a obtener unos resultados fiables.

### 3.2. Empalmes a flexión por cubrejuntas con tornillos ordinarios

#### a) Premisas al diseño de la unión

Debido a la falta de normativa que regule las uniones de elementos estructurales de GFRP, se ha considerado de interés verificar experimentalmente diferentes modos de fallo previstos y formulados por fabricantes. Para ello, se ha procedido a construir una serie de empalmes a flexión de vigas doble T de GFRP de dimensiones similares a los perfiles IPE 120 de la estructura metálica. Estas vigas se han unido mediante cubrejuntas de GFRP por sus alas, usando tornillería ordinaria con una precarga de montaje de 9,8 Nm.

Según los fabricantes de los perfiles de GFRP, podrían presentarse cinco modos de fallo diferentes para este tipo de uniones entre cubrejuntas y ala:

- Modo 1: fallo de la sección neta (tracción).
- Modo 2: fallo por tensión transversal en la parte final de la probeta.
- Modo 3: fallo por rasgado longitudinal (anisotropía del GFRP).
- Modo 4: fallo por compresión inclinada en el lateral del agujero.
- Modo 5: fallo por aplastamiento de la pared de los agujeros en sentido longitudinal. Este modo de fallo y el anterior serían los más beneficiosos puesto que en la realidad no produciría una rotura frágil.

La Figura 1 anexa muestra los modos de fallo, de tal suerte que el 1 y 4 también tendrían sus simétricos, no dibujados.

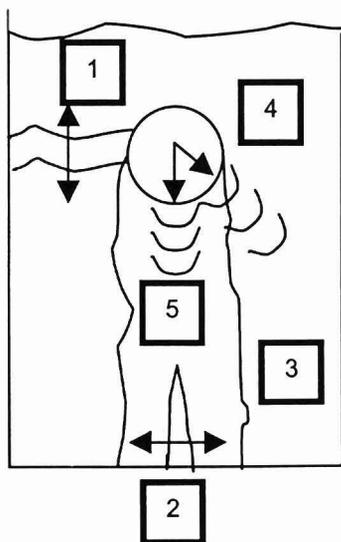


Figura 1.- Modos de fallo 1 a 5.

Para estos ensayos se ha considerado adecuado diseñar un empalme central con cubrejuntas en una viga de 2 m de luz entre apoyos, estando los puntos de aplicación de carga separados 70 cm entre sí. Los cubrejuntas están constituidos por láminas unidireccionales (8 x 50 mm de sección) y los perfiles son IPE120 (6 x 60 mm de sección), ambos de distintos fabricantes.

La aplicación de la carga se realiza por medio de un único cilindro hidráulico conectado a una célula de carga. Con las variaciones de dimensiones y los perfiles disponibles, fue posible diseñar para tres modos puros de fallo, de los cinco posibles. Los tres modos de fallo adoptados han sido: por sección neta, por rasgado y por aplastamiento longitudinal (compresión local) del agujero del tornillo. Para evitar excentricidades y momentos no deseados, se ha optado por colocar un tornillo a cada lado del alma, de manera que, como mínimo, quede una unión equilibrada con 2 tornillos por cubrejuntas a cada lado del empalme.

#### b) Implantación del ensayo

Debido a la experiencia en campañas experimentales previas, se consideró necesario colocar rigidizadores bajo las cargas aplicadas y apoyos, así como realizar un guiado lateral de las vigas para evitar fenómenos secundarios no deseables: pandeo local, compresión del alma, fenómenos de alabeo y torsión. Dicho guiado se ha resuelto por medio de una estructura cajón auxiliar constituida por medio de unas láminas de policarbonato fijadas a un armazón de acero formado por cuatro largueros y varios montantes, todos ellos de tubo estructural. En la Figura 2 se presenta la disposición del ensayo y utillaje empleados para su correcto desarrollo, con los consiguientes elementos de ensayo.

Durante el ensayo se han obtenido datos de la carga aplicada, así como la deformación del punto central y las dos secciones de aplicación de la carga en las probetas.

Los parámetros geométricos que intervienen en el diseño de la unión (Tabla 1) son:

$a$  = Distancia del centro del agujero a la parte frontal de la probeta.

$b$  = Longitud con tensiones transversales en la parte final de la probeta.

$c$  = Distancia del centro del agujero a la parte lateral de la probeta.

$d$  = Diámetro del agujero.

$t$  = Espesor de la probeta ensayada.

A continuación se presenta un resumen del diseño adoptado para las uniones calculadas para que se produzcan los tres modos puros de fallo.

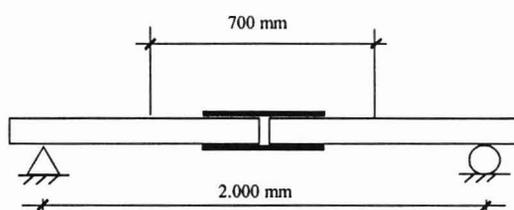
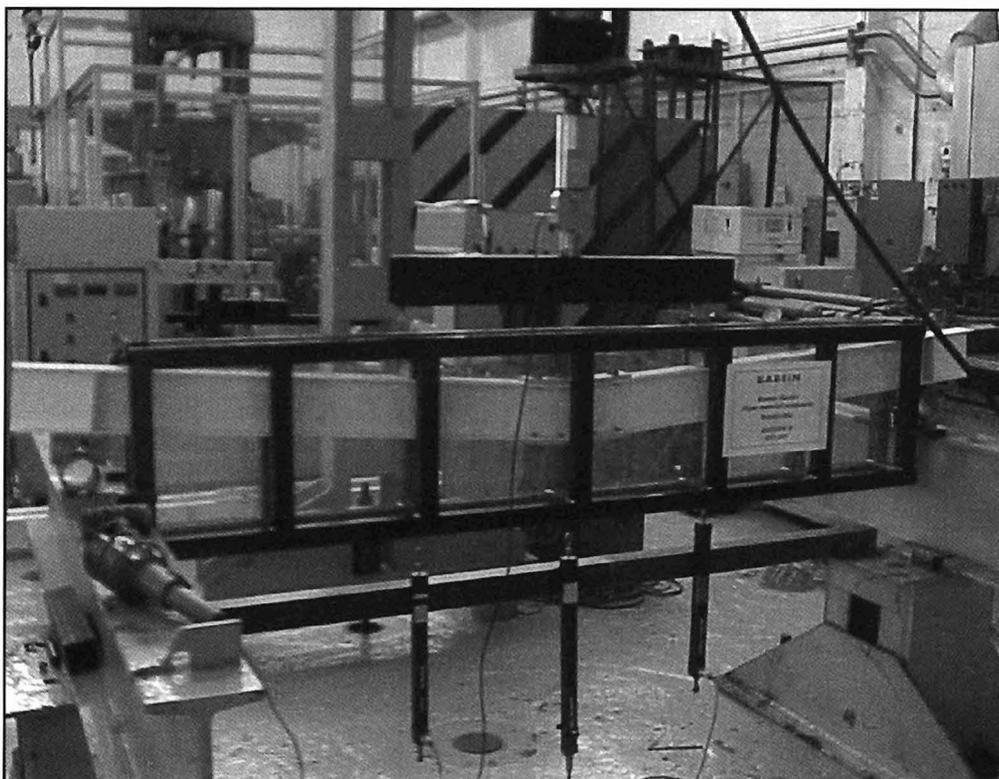


Figura 2.- Ensayo uniones atornilladas en empalme a flexión en 4 puntos.

TABLA 1

Parámetros geométricos en uniones atornilladas de empalme a flexión

Unión	Tornillos		Alas IPE 120 (mm)					Cubrejuntas (mm)				
	Nº	Tipo	a	b	c	d	T	a	b	c	d	t
Modo 1	2	M14	125	15	17,5	15	6	125	15	12,5	15	8
Modo 3	4	M8	31,5	9	17,5	9	6	31,5	9	12,5	9	8
Modo 5	4	M8	65	9	17,5	9	6	65	9	12,5	9	8

### c) Resultados experimentales

Se fabricaron las probetas necesarias para llevar a cabo tres ensayos por cada modo de fallo diseñado (modos 1, 3 y 5), de forma que se experimentaron un total de 9 uniones. En la Tabla 2 se dan las cargas, calculadas y ensayadas, de rotura de las vigas empalmadas para los tres modos considerados.

La Figura 3 presenta la imagen de la rotura por rasgado longitudinal para el modo 3 (diseñada también a modo 3 según la tabla 2 anterior) y en la Figura 4 se incluyen las curvas carga-flecha de las tres vigas ensayadas según su diseño para este modo de rotura.

Se ha obtenido un comportamiento simétrico en la ley de flecha para los flexímetros situados equidistantes a izquierda y derecha del centro de vano. En la figura 3 se incluye una línea teórica de relación carga vs flecha en una viga equivalente sin empalme, al objeto de comprobar la influencia del empalme en la rigidez.

De los resultados obtenidos en los ensayos de todas las uniones (6ª columna de la Tabla 2), se presenta la gráfica de valores medios en la Figura 5. En ella se incluye, bajo el epígrafe "modelo simplificado", la curva aproximada del comportamiento de la rigidez de este tipo de uniones.

Analizando el conjunto de datos obtenidos de los tres grupos de vigas ensayadas, se han constatado faltas de co

TABLA 2  
Cargas últimas experimentales y formas de rotura

Fallo esperado	Fallo experimentado	Carga Experimental última (KN)				Carga calculada (KN)
		Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Media <sup>(II)</sup>	
Modo 1 Cubrejuntas	Modo 3 Rasgado cubrejuntas	11,18	12,69	10,99	11,48	18,51
Modo 3 <sup>(I)</sup> Ala IPE 120	Modo 3 Rasgado cubrejuntas	14,55	15,23	15,20	14,99	4,25
Modo 5 Ala IPE 120	Modo 5 + Modo 3 Ovalización en ala + rasgado cubrejuntas	18,55	21,05	20,35	19,98	9,53

(I) Consultar los valores producidos durante el ensayo según figura 4

(II) Consultar los valores experimentales medios de los tres modos de fallo esperados según figura 5

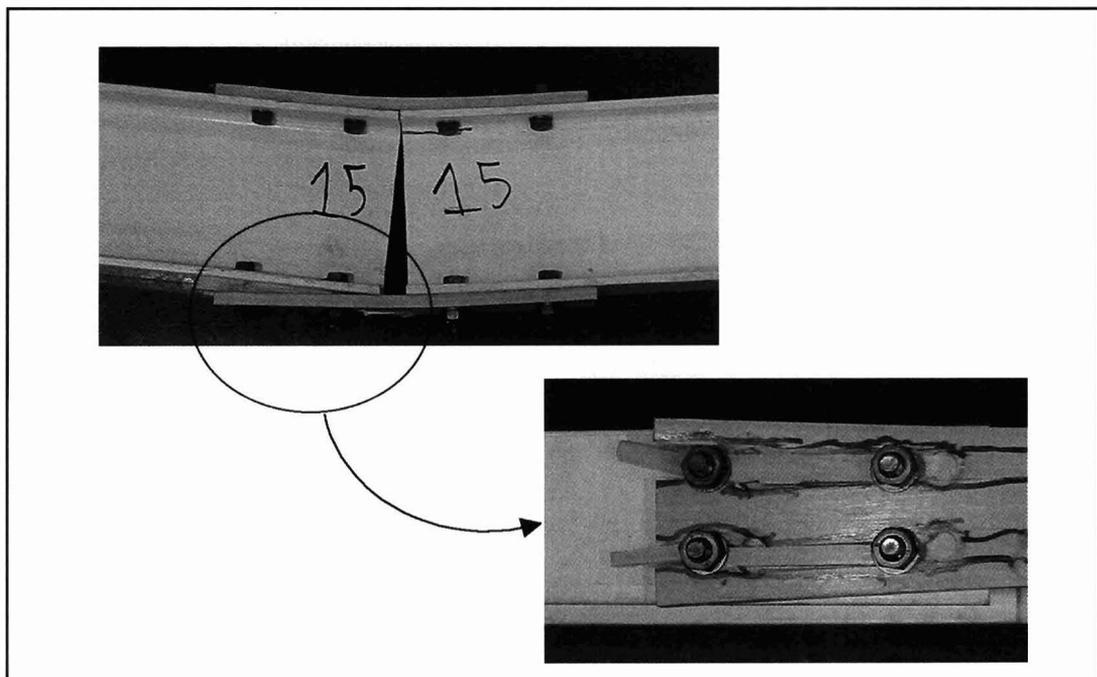


Figura 3.- Ensayos para el modo 3 de rotura.

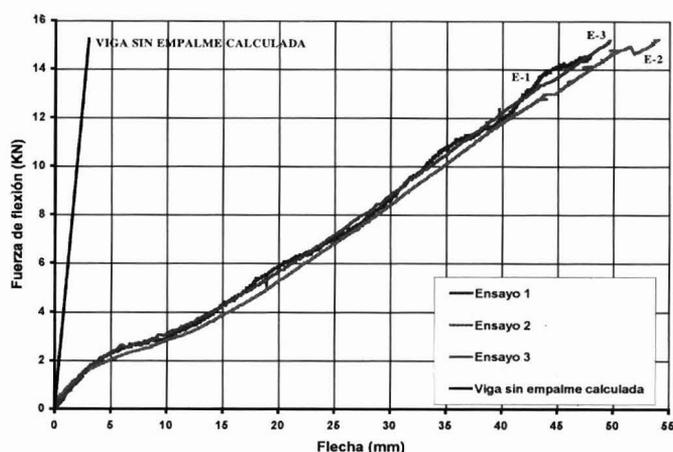


Figura 4.- Ensayos a flexión para el empalme diseñado a modo 3 de rotura.

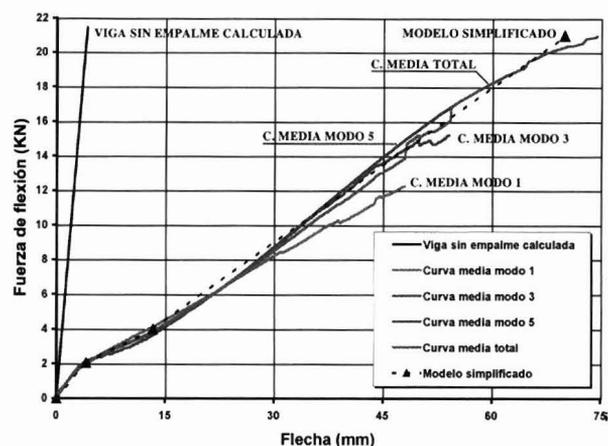


Figura 5.- Valores medios de ensayos a flexión para los empalmes diseñados a modos 1, 3 y 5.

respondencia entre el modo y lugar de rotura previsto por cálculo y lo sucedido en la realidad (Tabla 2). A este respecto, en el diseño a modo 1 (fallo por cubrejuntas) el valor real es menor que el calculado. Ocurre, sin embargo, una inversión de resultados en los casos de diseño a fallos según modos 3 y 5 (con coeficientes de seguridad superiores a dos).

Del análisis del proceso de diseño y los resultados contradictorios del plan de ensayos, hemos extraído como cuestiones muy importantes para este tipo de diseño:

- Necesidad de un conocimiento preciso de las características mecánicas de todos y cada uno de los materiales intervinientes, con ensayos específicos del lote con que se trabaja.
- Necesidad, igualmente, de una mayor claridad en las fórmulas de cálculo al uso recomendadas por los fabricantes de perfiles pultruidos y, más aún, de la redacción de normativa oficial aplicable.

### 3.3. Viabilidad del uso de tornillos pretensados TAR. Estudio del aplastamiento de las piezas a unir

Se ha analizado la viabilidad del uso de los TAR para la resolución de uniones en los materiales compuestos. A priori, se señalan dos aspectos claves: la posible fluencia del GFRP bajo las fuertes presiones mantenidas por los tornillos con la consiguiente pérdida de apriete y, por otra parte, el bajo coeficiente de rozamiento entre superficies, esperable sin utilizar soluciones especiales, derivado del acabado superficial de estos materiales (gel-coat). La intención de estos ensayos es reproducir la zona de influencia del conjunto tornillo y paquete de láminas de GFRP, frente a unas condiciones determinadas de apriete, en una unión tipo de empalme de perfiles abierta, por medio de cubrejuntas como elementos de transición.

Para la medida de fuerzas en los tornillos, se instrumentaron TAR 12.9 de  $\varnothing 20\text{mm}$  embebiendo longitudinalmente en su caña la extensometría específica tipo BTM-6C, según la Figura 6.

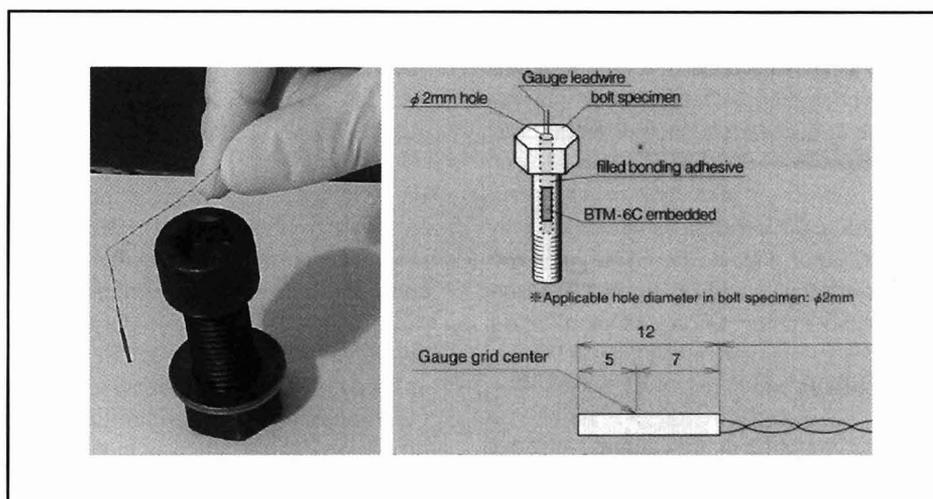


Figura 6.- TAR 12.9,  $\varnothing 20\text{ mm}$  con galga a embeber en su caña.

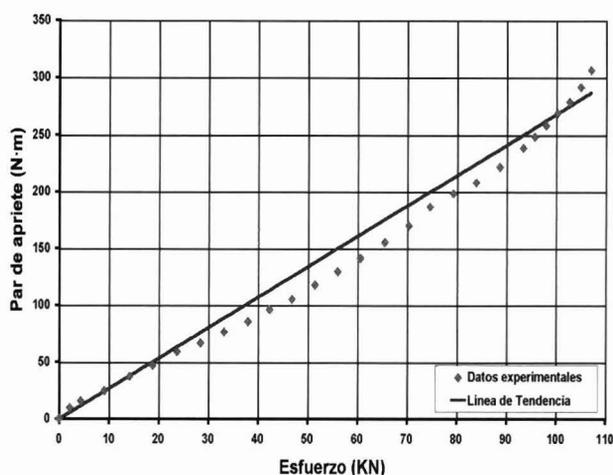


Figura 7.- Par de apriete vs esfuerzo de tracción en TAR 12.9,  $\phi$  20 mm.

En la Figura 7 se presenta la curva de esfuerzo axial frente a par de apriete, que sirve de referente en la calibración del TAR 12.9.

La figura anterior se ha obtenido a partir de otra intermedia correspondiente al ensayo de tracción frente a deformación axial, obteniendo la línea de tendencia más ajustada a los resultados experimentales de la línea de puntos rojos. En el ensayo de par, una vez colocado el TAR dentro de un bloque macizo de acero de referencia (de iguales dimensiones que el paquete de GFRP a reproducir), se aplicaron sucesivos pares de apriete midiendo los respectivos alargamientos axiales del tornillo instrumentado. Relacionando estas deformaciones con las del ensayo a tracción, se obtuvo la curva par-tracción del TAR 12.9.

La utilidad de la curva anterior radica en que permite conocer, en todo momento, para un par determinado de apriete, la carga axial aplicada a la unión. En dicha Figura se ha incluido la línea recta correspondiente al coeficiente  $k = 0,145$  que relaciona el par con la tracción en la fórmula:  $M_o = k \cdot d_o \cdot N$  y que depende de la fricción al apretar la tuerca, para el estado de lubricación del tornillo ensayado. El valor de referencia de  $k$  en estructuras está comprendido entre 0,15 y 0,18, pero en la realidad se producen intervalos mayores, por lo que es necesario el ensayo en las condiciones reales de utilización.

Para los ensayos de apriete en arandela vs relajación (ensayo de aplastamiento) en el paquete de GFRP, siempre teniendo en cuenta las referencias de sus límites de resistencia última y de servicio a compresión, se han utilizado distintos escalones de carga crecientes, evaluando la relajación respectiva (ver Figura 8).

El paquete de GFRP se compone de tres láminas de 50 x 50 mm de lado, totalizando un espesor de 32 mm. La arandela tipo tiene un diámetro exterior de 36 mm y un diámetro interior de 21 mm. El estudio se ha extendido a lo lar-

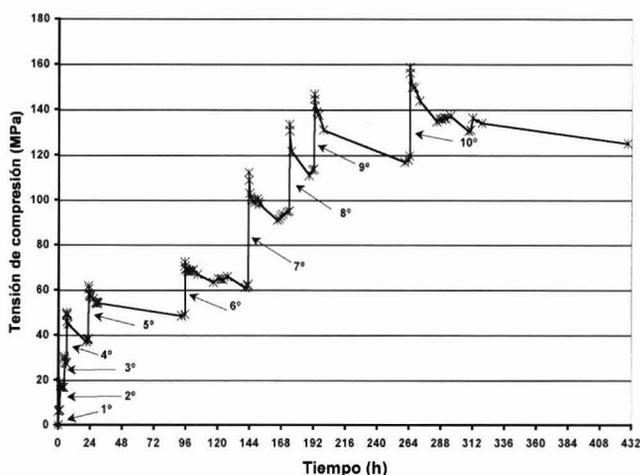


Figura 8.- Relajación en sucesivos escalones de apriete sobre paquete de GFRP.

go de 18 días en escalones ente 24 a 72 horas (Tabla 3), siguiendo la curva experimental par-esfuerzo de la Figura 7.

En los escalones 1 al 6, el par de apriete se ha aplicado con llave dinamométrica. Asumiendo la heterogeneidad de los tiempos de mantenimiento teórico de un escalón de carga, la relajación media experimentada por el tornillo en escalones entre 24 y 72 horas alcanza un valor próximo al 20%. Con este método de carga de subida incremental por escalones, y mantenimientos intermedios, la relajación obtenida para los escalones de carga más elevados es menor que si se carga la totalidad en un solo escalón. Como consecuencia de las relajaciones obtenidas en el caso anterior, se estimó oportuno analizar el efecto de "reposición del par". Para ello, se tomó como referencia el par de apriete que correspondiera a dos valores de compresión entre arandela y conjunto de GFRP: un valor de estado límite de servicio para cargas de corto período de aplicación (ELSC) y otro para cargas de largo período de aplicación (ELSL). En las Figuras 9 y 10 se observa el fenómeno de reducción de fluencia del GFRP en posteriores ciclos de reposición de carga. En el caso del apriete mayor, la fluencia es prácticamente igual en los dos ciclos. Para la menos precargada aparece una fluencia en el segundo ciclo del orden de la mitad del primero.

En la Tabla 4 se presentan las "pérdidas" de carga de apriete en los diferentes ensayos realizados. Los resultados presentados, sobre el uso de los TAR en este tipo de uniones, constatan su desaprovechamiento para el caso de uniones precargadas. La relajación del tornillo es elevada llegándose a valores del orden del 50% de la carga inicialmente aplicada (par correspondiente al ELSC). Ello, junto con la incertidumbre de la variabilidad de estos valores, hace difícil la viabilidad de este medio de unión, de no ser que se utilicen diámetros de tornillos pequeños, arandelas especiales de superficie aumentada, con el fin de disminuir las presiones manteniendo la fuerza de apriete total.

TABLA 3  
Sucesión de pares de apriete vs relajación sobre paquete de GFRP

Escalón	Apriete		Relajación		Modo apriete
	Par (Nm)	Tensión (MPa)	Deformación	Fuerza	
5°	49,1	61,66	19,6 %	20,4 %	Llave dinamométrica
6°	58,9	72,32	15,0 %	14,5 %	
7°	68,6	112,25	18,8 %	18,5 %	
8°	78,4	133,37	16,7 %	16,9 %	Máquina de torsión
9°	88,2	146,64	19,4 %	19,6 %	
10°	98,1	158,49	18,7 %	18,7 %	

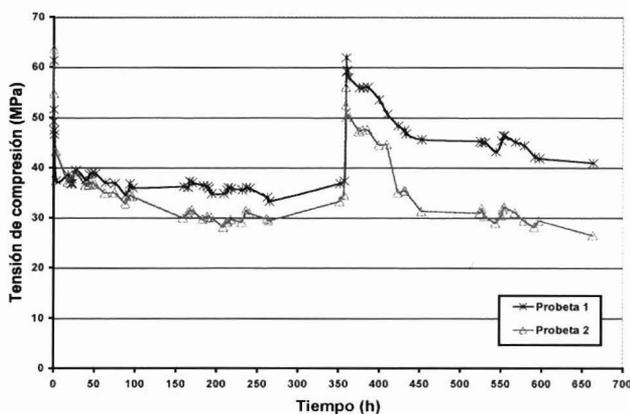


Figura 9.- Relajación en dos escalones sucesivos de apriete con cargas ELSC.

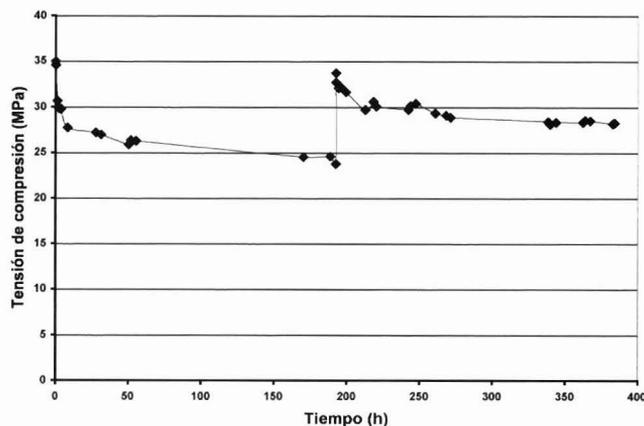


Figura 10.- Relajación en dos escalones sucesivos de apriete con cargas ELSC.

TABLA 4  
Pérdidas de apriete por relajación en dos ciclos sucesivos

Tiemplos	Pérdidas Apriete axil (MPa)		
	Precarga ELSC		Precarga ELSL
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 1
1 <sup>er</sup> Ciclo (357 h)	39,1 %	45,7 %	-
2 <sup>o</sup> Ciclo (307 h)	33,9 %	52,9 %	-
1 <sup>er</sup> Ciclo (192 h)	-	-	32,1 %
2 <sup>o</sup> Ciclo (192 h)	-	-	16,1 %

Tras el ensayo de aplastamiento, se ha realizado una inspección mediante microscopía al objeto de identificar los defectos generados en el apilamiento de fibras, consecuencia de las cargas de apriete en el paquete de fibroplástico. Para ello se ha llevado el apriete hasta el agotamiento por aplastamiento del GFRP, y, en ese punto, se ha realizado dicha inspección. En la Figura 11 se presenta una línea de

aplastamiento-rotura generada sobre las dos laminas externas (las que contactan directamente con la arandela en el lado de cabeza y tuerca, respectivamente).

Este fenómeno, a escala microscópica, se traduce en un agrupamiento localizado de las fibras. El gradiente de concentración aumenta el carácter anisótropo del fibroplástico

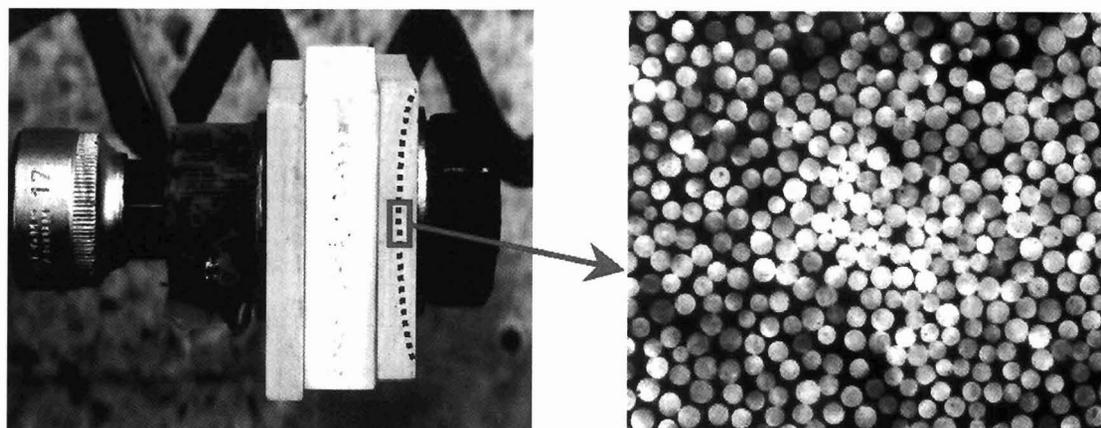


Figura 11.- Configuración y línea de aplastamiento en ensayo de unión precargada.

y podría asemejarse al efecto de las dislocaciones en las estructuras cristalinas, como precursoras de las deformaciones plásticas. Podría también decirse que “avisa” de roturas laminares de deslizamiento bajo elevadas compresiones locales.

El paso siguiente, dentro de la experimentación llevada a cabo, hubiera correspondido a estudiar el efecto del rozamiento en este tipo de uniones. Este aspecto no se aborda ante los resultados de relajación presentados anteriormente, ya que los márgenes de posible aprovechamiento del rozamiento serían muy reducidos e inseguros por motivo de la relajación.

#### 4. CONCLUSIONES

El estudio de uniones puras atornilladas (en ausencia de adhesivo) pone de manifiesto la sensibilidad del comportamiento al tipo y propiedades del perfil pultruido de GFRP empleado. La dirección de las fibras, el tipo de resina y la geometría de los perfiles, son determinantes a la hora de calcular las cargas de agotamiento. No nos parece suficiente la utilización de valores genéricos de propiedades sino que es necesaria la certificación de ensayos específicos de los lotes con que se trabaja.

Las formulaciones de cálculo al uso, proporcionadas en la mayoría de los casos por los fabricantes, requieren de un profundo conocimiento de los modos de fallo, desde dentro de propio proceso de diseño y construcción. Es decir, a diferencia de otros materiales más comúnmente empleados (acero, aluminio, madera, hormigón, etc.), el diseño debe tener en consideración el tipo de perfil (materiales constituyentes y geometría) de GFRP. Por todo ello, para evitar riesgos, el proyectista debe acudir a una verificación experimental de comportamientos previstos por el cálculo.

En lo referente al grado de deformabilidad en las uniones con tornillos ordinarios, hay que señalar que introducen una pérdida de rigidez importante en la estructura. De las Figuras 3 y 4 se constata que en el caso particular de las vigas de dos metros, empalmadas en el centro y ensayadas, se ha multiplicado su flecha por 16, respecto a la teórica calculada para un perfil entero. El diseño de dispositivos que garantizan uniones precargadas (pretensadas) podría reducir (rozamiento entre superficies) parte del descenso de rigidez de la unión de modo que puede apuntarse ésta línea de trabajo para investigaciones futuras, puesto que estos materiales tienen una clara tendencia a incumplir los estados Límites de Servicio por deformabilidad.

En los ensayos realizados en el ámbito de uniones estructurales atornilladas, hay que destacar primero la falta de aprovechamiento que presenta el uso de TAR en las condiciones ensayadas, siguiendo la metodología tradicional. Este tipo de resolución de uniones con material compuesto presenta graves carencias, derivadas de las diferentes características mecánicas de ambos materiales, destacando la fluencia del material compuesto. A este respecto, puede destacarse la posibilidad real de mejorar el aprovechamiento de las uniones puras atornilladas, modificando las dimensiones geométricas de las arandelas utilizadas y variando el material de la tornillería (posibilidad de uso de aluminio, material compuesto, etc.), al objeto de disminuir las presiones.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren expresar su agradecimiento a MCYT (n° exp. G48975767/1) y Gobierno Vasco (OD01LA03) por el soporte económico dado a los trabajos aquí presentados.

**BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Antonio Miravete et al. *Materiales Compuestos*. Tomos I y II. Ed. Antonio Miravete. ISBN 84-921349-7-6. Dep. Legal: Z-1462-2000.
- [2] Gordon Wight, Dr., et al. Royal Military College of Canada, Kingston, ON, Canada. *Canadian Federal Interest in FRP*. *Structural Engineering International*. SEI vol. 12, Number 2. May 2002
- [3] D. Cobo del Arco, R. Burgueño, F. Seible y A. Mari. Utilización de materiales compuestos avanzados en el proyecto de un puente atirantado. *Hormigón y Acero*, nº 216, 2º Trimestre 2000.
- [4] Mark A. Ehlen. Life cycle costs of Fiber-Reinforce-Polymer bridge decks. *Journal of Materials in Civil Engineering*. August 1999.
- [5] Análisis y cálculo de estructuras de materiales compuestos. Ed. Oller, S. Publicado por CIMNE, Barcelona España. Junio 2002.
- [6] Ian Firth, Partner, David Cooper, Associate, Flint & Neill Partnership London, UK. *New materials for new bridges, UK*. *Structural Engineering International*. SEI vol. 12, Number 2. May 2002.
- [7] Thomas Keller. *Use of fibre reinforced polymers in bridge construction*. IABSE, AIPC y IVBH. ISBN 3-85748-108-0, Zurich (Suiza). 2003.

\* \* \*