las uniones atornilladas pretensadas en la construcción metálica

845 - 9

0. Introducción

A las uniones roblonadas y atornilladas clásicas y a las costuras soldadas, que tan rápidamente se han generalizado en la construcción metálica en el último cuarto de siglo, ha venido a sumarse, en los últimos años, un nuevo método de enlace, semejante a los dos primeros, pero diferente de ellos por la concepción de su mecanismo de transmisión de esfuerzos.

Se trata de las costuras realizadas mediante tornillos de acero de alta resistencia, apretados fuertemente, con el fin de engendrar una gran reacción de rozamiento entre las superficies en contacto y aprovechar esta reacción de rozamiento para la transmisión de los esfuerzos de los perfiles unidos.

Con la utilización de estos tornillos de alta resistencia se intenta sacar partido de un hecho conocido de antiguo: la colaboración que, en la resistencia de las uniones roblonadas, presta el rozamiento de las superficies de los perfiles o chapas unidas.

J. BATANERO, Ingeniero de Caminos

Fotografía amablemente facilitada por la
Editorial Wilhelm Ernst & Sohn

Pero así como la eficacia de este rozamiento en las uniones clásicas escapaba a toda posibilidad de regulación o control, en las nuevas se puede evaluar su magnitud, y conocer, por tanto, con suficiente certidumbre, el margen de seguridad de la costura.

Si bien los primeros ensayos de uniones de este tipo se realizaron en Inglaterra en el año 1934 por el Profesor C. Batho, quien utilizó tornillos de alta resistencia para sustituir a los roblones en sus ensayos sobre la rigidez de uniones de vigas a columnas, y aunque desde el año 1938 se hicieron algunas aplicaciones esporádicas en EE. UU., no fue hasta 1947 cuando el «Research Council on Riveted and Bolted Structural Joints», de la «Engineering Foundation», comenzó sus investigaciones, que cristalizaron en las primeras especificaciones americanas que regulaban el cálculo y la práctica de estas uniones. En Alemania los ensayos comenzaron, en diversos laboratorios de investigación técnica, hacia el año 1950, y se publicaron por la Stahlbau-Verband las primeras Instrucciones Provisionales en el año 1956.

Es curioso señalar que la técnica de las uniones atornilladas con fuerte pretensado del tornillo venía siendo aplicada, desde muy atrás, en la construcción de máquinas, sobre todo en los motores de explosión. ¿Por qué, entonces, no se generalizó en la construcción ordinaria después de los primeros ensayos y aplicaciones? Pues sencillamente, porque los primeros intentos coincidieron con las primeras aplicaciones en gran escala de la técnica de la soldadura a las estructuras y puentes metálicos; y éstas, con sus éxitos y sus fracasos, absorbieron todo el interés de los proyectistas y constructores.

Posteriormente, al conocerse mejor, y a medida que se iban acumulando datos experimentales, se comprendió que no siempre la soldadura era el medio óptimo de unión de las construcciones de acero. Sobre todo en muchas uniones de montaje que, no pudiéndose realizar en las condiciones más apropiadas, como puede hacerse en el taller, no ofrecían el grado de confianza necesario, o, por lo menos, el conseguirlo suponía un exceso de coste inútil. Por ello comenzaron a generalizarse, tanto en América como en Europa, las construcciones con uniones de taller soldadas y uniones de obra roblonadas o atornilladas.

La utilización ponderada de soldadura y tornillos, dentro de la misma estructura, puede conducir a soluciones excelentes. Pero el tornillo clásico, perfectamente aceptable en estructuras solicitadas por cargas estáticas o cuasi-estáticas, no lo es en aquellas otras que, por razones del servicio, están sometidas a efectos dinámicos o vibraciones que puedan conducir al aflojamiento de las tuercas. En estas últimas construcciones se hacía imprescindible el empleo de roblones.

Entre tanto, la expansión de la soldadura había ido produciendo una penuria creciente de mano de obra cualificada para el roblonado. Esta fue, quizá, la primera razón que impulsó a poner sobre el tapete los tornillos de alta resistencia. Y sus primeras aplicaciones fueron las de sustituir a los roblones que se iban aflojando en los puentes de los ferrocarriles americanos.

Pero el desarrollo de esta nueva técnica quizá no hubiera sido tan rápido, a partir de 1951, si, al mismo tiempo, no se hubiera comprobado que en los montajes resultaba más económico el colocar un tornillo de alta resistencia que un roblón; al menos dentro de las circunstancias americanas.

No están todavía puestos a punto ni los métodos de cálculo ni las formas propias de estos enlaces; pero parece conveniente exponer, en un breve resumen, los fundamentos y los primeros pasos de esta técnica. Con la esperanza fundada de que los ingenieros españoles puedan asimilarla y contribuir a impulsar su desarrollo, con la misma rapidez y decisión con que, en circunstancias más difíciles que las actuales, acometieron el empeño de difundir en nuestro país la técnica de la soldadura, logrando realizaciones, muchas de las cuales continúan sirviendo de modelo en el campo de las estructuras y los puentes soldados.

1. Forma y materiales de los tornillos de alta resistencia

Desde el punto de vista de su forma y dimensiones, los tornillos de alta resistencia no difieren, en su aspecto general, de los tornillos ordinarios.

Constan (fig. 1) del tornillo propiamente dicho, su tuerca y dos arandelas fuertes. Sus dimensiones corresponden a las normalizadas en cada país, con algunas ligeras modificaciones, que responden a la necesidad de robustecerlos lo más posible. Así, por ejemplo, las Instrucciones Provisionales alemanas, aún prescribiendo que los tornillos, tuercas y arandelas deben ajustar sus dimensiones a las fijadas por las normas DIN 931, 934 y 128, respectivamente, especifican además:

- a) Que el redondeo de acuerdo entre vástago y cabeza del tornillo sea, como mínimo, de 1 mm de radio para los diámetros de vástago iguales o inferiores a 14 mm; de 1,5 mm, para diámetros entre 16 y 20 mm, y de 2 mm, para diámetros iguales o superiores a 22 mm. Tolerancia basta para la cabeza y el vástago; y media para la rosca.
- b) Que el espesor de las arandelas debe ser, como mínimo, de 4 mm para los diámetros comprendidos entre 14 y 24 mm; de 5 mm, para los superiores a 24 mm, y de 3 mm, para los inferiores a 14 mm.
- c) Que, en una de las caras de la arandela, deben tallarse los bordes externo e interno en forma cónica, como se indica en la figura. El tallado interno está destinado a alojar el redondeo entre vástago y cabeza, con el propósito de conseguir un buen asiento de la superficie interior de ésta sobre la arandela. El tallado exterior no tiene otro fin que el de certificar la buena colocación de la arandela.

La longitud de vástago puede obtenerse mediante la fórmula:

$$L = e + d + 8 \text{ (mm)}$$

En dicha tabla se incluye también una casilla que da la fuerza P_p con la que se pretensa el tornillo; pero este valor, para una determinada calidad del acero, depende también, y únicamente, del diámetro del tornillo, pues, como veremos a continuación, la tensión de pretensado obtenida está en una relación constante con el límite elástico del material.

Antes de pasar adelante conviene hacer unas aclaraciones sobre los valores del coeficiente de seguridad que figuran en dicha tabla. Los dos primeros (1,10 y 1,25) se utilizan en las estructuras ordinarias; y los dos segundos (1,40 y 1,60) se emplean en los puentes y estructuras de grúas, siendo estos dos últimos mayores para asegurar que no se produce el deslizamiento de la junta ni aun ante las sollicitaciones de fatiga.

Evidentemente, la carga total que pueda transmitir la costura vendrá dada por la expresión

$$F = m \cdot n \cdot T_{adm},$$

si todos los tornillos, como es lógico, son del mismo diámetro; en esta expresión n representa el número de tornillos y m es el número de superficies posibles de deslizamiento (es el equivalente al número de secciones de corte en las costuras roblonadas).

Queda como problema la forma de conseguir, con seguridad, la fuerza de tensado del tornillo, que, para cada diámetro, se indica en la segunda columna de la tabla III.

El criterio alemán es tensar el tornillo hasta que la máxima tensión en el núcleo del mismo, calculada teniendo en cuenta la tracción longitudinal y la tensión tangencial debida al momento de torsión aplicado durante la apretadura, alcance, por lo menos, el 80 % del valor del límite elástico aparente.

Pero nosotros, al ejecutar una costura atornillada, lo único que podemos medir es el momento máximo de torsión aplicado exteriormente al apretar la tuerca. La medición se hace con llaves taradas, como las que se representan en la figura 3.

La expresión de este momento exterior puede escribirse:

$$M_{TE} = P_p \cdot r \cdot \operatorname{tg} \gamma + P_p \cdot \mu_1 \cdot r + P_p \cdot \mu_2 \cdot r_c = P_p \cdot [r(\operatorname{tg} \gamma + \mu_2) + \mu_2 \cdot r_c],$$

en cuya expresión son:

r = radio medio de la rosca.

r_c = radio medio de la tuerca y de la cabeza del tornillo.

γ = ángulo de inclinación de la rosca.

μ_1 = coeficiente de rozamiento entre las roscas de tornillo y tuerca.

μ_2 = coeficiente de rozamiento entre tuerca y arandela.

Si en la expresión anterior hacemos

$$D \cdot K = r \cdot (\operatorname{tg} \gamma + \mu_1) + r_c \cdot \mu_2,$$

nos queda:

$$M_{TE} = K \cdot D \cdot P_p,$$

siendo D el diámetro nominal del tornillo.

El valor de K se ha medido experimentalmente para diámetros de tornillos comprendidos entre 12 y 24, encontrándose un valor

$$K \approx 0,165$$

prácticamente independiente del diámetro y de las condiciones de las superficies de contacto entre tornillo, tuerca y arandela, por lo menos dentro

de los límites de superficies aceptablemente limpias y cuidadas, puesto que los ensayos se realizaron con superficies de contacto engrasadas y con superficies fosfatadas, y se han obtenido los mismos resultados. Los ensayos se efectuaron midiendo con llaves taradas los momentos exteriores y mediante extensómetros de resistencia las deformaciones del vástago del tornillo.

Por otra parte, se han medido también los momentos de torsión eficaces a que está sometido el núcleo del tornillo; y se ha encontrado que este momento eficaz está en relación prácticamente constante con el momento de torsión exterior:

$$M_{TI} = 0,59 \cdot M_{TE}$$

relación independiente también de las características de las tuercas y arandelas.

Conocemos, pues, los valores de P_p y M_{TI} en función de M_{TE} que podemos medir. El núcleo del tornillo estará sometido a una tensión longitudinal de tracción:

$$\sigma = \frac{P_p}{A_N} = \frac{M_{TE}}{K \cdot D \cdot A_N}$$

en la que A_N representa el área de la sección transversal del núcleo. Y a una tensión tangencial originada por el momento torsor eficaz:

$$\tau = \frac{M_{TI} \cdot r_N}{I_p} = \frac{0,59 \cdot M_{TE} \cdot r_N}{I_p}$$

en la cual I_p indica el momento de inercia polar de la sección del núcleo del tornillo y r_n es su radio. Como la sección es circular,

$$I_p = \frac{\pi(2r_N)^4}{8}$$

Utilizando como fórmula para la tensión de comparación la de Hencky - Huber - von Mises,

$$\sigma_c = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2},$$

y sustituyendo en ella los valores anteriormente encontrados para σ y τ , se obtiene:

$$\sigma_c = 1,28 \cdot \sigma = 1,28 \cdot \frac{P_p}{A_N},$$

y como queremos que sea $\sigma_c = 0,8 \cdot \sigma_{0,2}$, resulta:

$$P_p = \frac{0,8 \cdot \sigma_{0,2} \cdot A_N}{1,28}$$

y

$$M_{TE} = K \cdot D \cdot P_p \cdot 1,10,$$

con cuyas expresiones está calculada la tabla IV, en la que se dan los valores de P_p , M_{TE} y, además, el área de la sección transversal del núcleo para los diferentes diámetros de tornillos. El factor 1,10 es un coeficiente de seguridad.

Dado el estado actual de nuestros conocimientos sobre este tipo de costuras, los datos consignados en las tablas I a IV no deben extrapolarse para otros diámetros sin previa experimentación.

Con este criterio expuesto, es evidente que la eficacia de la junta depende no solamente de la consecución de la fuerza de tensado en cada tornillo, sino de su conservación en el tiempo. Pero la comprobación periódica de ello es fácil. Basta elegir al azar un cierto número de tornillos y aflojar sus tuercas un sexto de vuelta aproximadamente. Si su tensado es correcto se necesita, para esta operación, aplicar un momento del orden del 70 al 75 % del que, para el diámetro del tornillo en cuestión, figura en la tabla IV. Aunque todavía es corta la experiencia, parece ser que el pretensado de la junta se conserva sin relajamientos apreciables, aun en juntas solicitadas por cargas dinámicas.

En contraposición con el método alemán expuesto, el criterio americano es, en vez de medir momentos, provocar en los tornillos un esfuerzo que supere al límite elástico convencional. Este método permite eludir la dificultad de la medida precisa del momento de torsión que requiere el criterio alemán, sustituyéndolo por una determinación grosera del alargamiento que asegure la entrada del material en la zona de deformaciones permanentes y, por tanto, el esfuerzo de tensado.

Para ello se utiliza en América el método llamado «part-torque, part-turn». Consiste en apretar fuertemente el tornillo a mano y girar, a continuación, la tuerca, con llave neumática, de media a una vuelta. En la tabla V se dan, para tornillos de distintos diámetros y longitudes, el número de vueltas necesarias con el fin de conseguir el tensado suficiente y para lograr la rotura; son datos obtenidos experimentalmente.

A causa del comportamiento plástico del acero, con su largo escalón de fluencia, es evidente que influye muy poco en la tensión final el mayor o menor grado de apretadura conseguida a mano en la primera fase. Ni, por la misma razón, es necesario ser excesivamente escrupulosos en la fijación del giro exacto de la tuerca durante la segunda fase. La tabla V nos dice que, después de conseguido el tensado, es necesario girar la tuerca de dos a tres vueltas para conseguir la rotura, lo cual parece dar una seguridad suficiente.

No obstante, hay que llamar la atención sobre los posibles peligros que puede representar el haber sobrepasado el límite elástico en el material del tornillo. Claro está que esto ocurre también en los vástagos de los roblones; pero el material de los roblones tiene un gran alargamiento de rotura, que no poseen, en tan alto grado, los aceros con los que se fabrican los tornillos de alta resistencia.

4. Normas de buena práctica

Los ensayos y las aplicaciones prácticas de este tipo de costuras se han realizado, hasta ahora, con buen éxito, enlazando piezas con espesores comprendidos entre 4 y 30 mm. Estos espesores cubren prácticamente el campo de la mayor parte de las construcciones metálicas. Obsérvese la precaución de no extrapolar, utilizándolas para espesores mayores o menores, sin experimentación previa.

Según demuestran los ensayos realizados recientemente, la técnica de los tornillos de alta resistencia puede aplicarse también a las uniones de las estructuras de aleaciones ligeras. Mediante medidas adecuadas pueden conseguirse coeficientes de rozamiento del orden de 0,55 a 0,65. Como estas aleaciones son más blandas que los aceros, deben utilizarse arandelas de mayores dimensiones. No obstante, antes de poder recomendar su aplicación general en las estructuras de aleación ligera, hay que resolver una serie de cuestiones que están todavía sobre el tapete; entre las cuales quizá sea la de mayor importancia el problema de la corrosión en las superficies de contacto.

De momento, y mientras no se estudie más detenidamente este punto, se pueden observar las mismas reglas que se dan para las costuras roblonadas, en cuanto a paso, distancias de agujeros a los extremos de la pieza y gramiles se refiere.

A causa de la gran rigidez de este tipo de unión y para poder efectivamente considerar que el reparto del esfuerzo se hace por igual entre todos los tornillos, no deben colocarse más de cinco en fila en la dirección del esfuerzo exterior.

A pesar de la precaución anterior, no debe olvidarse que siempre quedarán más solicitados los tornillos extremos que los centrales de la junta. Por ello son preferibles las costuras anchas y cortas; conviene comenzar apretando los tornillos hasta lograr un 80 %, aproximadamente, de la fuerza de pretensado en todos ellos, y terminar de apretarlos en una segunda fase. El orden que debe seguirse es el indicado en la figura 8.

Incluso, en las costuras importantes, puede estudiarse la conveniencia de colocar al principio, en la zona central, los tornillos necesarios para resistir los esfuerzos debidos al peso propio y a la carga permanente, y, una vez entrados en carga estos tornillos, colocar y apretar los restantes, correspondientes a los extremos de la costura.

Los agujeros pueden punzonarse o taladrarse según lo permitan las normas en vigor para cada tipo de estructura. En general no es necesario el escariado. Los agujeros deben tener un diámetro superior en 1 mm al nominal del tornillo.

5. Consideraciones finales

La figura de la portada, tomada de un trabajo del Profesor A. Dörnen, publicado en el número 1 de 1958 de la revista «Der Stahlbau», es la fotografía de un nudo inferior de un puente Warren sobre el canal Lippeseiten.

puente del Ruhr

La figura 10, tomada de un trabajo del Dr. Ing. K. Dörnen, incluido en el cuaderno 12 de las publicaciones de la «Deutschen Stahlbau-Verband», representa el esquema de un puente sobre el Rhur. En la figura 11 se incluye una fotografía de uno de sus nudos inferiores.

En las tres figuras anteriores, que son un pequeño índice de la aplicación de las uniones pretensadas en los puentes alemanes modernos, se comprueba la utilización simultánea de uniones soldadas y atornilladas. En efecto, los tornillos de alta resistencia son, todavía, demasiado caros frente a los otros medios de unión para poder generalizar, sin más, su empleo.

Repetimos que, hoy por hoy, su principal interés radica en las uniones de montaje, en las que pueden resultar más económico que los métodos clásicos por la sencillez de su realización y los medios auxiliares, prácticamente nulos, que requieren para su ejecución.

nudo inferior

11

El interés despertado por estas uniones se refleja en la numerosa bibliografía que las revistas técnicas van acumulando sobre la materia, y también en los variados ensayos que, muy especialmente alemanes y americanos, tienen en curso de realización para ver de aclarar los múltiples problemas que todavía están en pie.

Por primera vez se han presentado comunicaciones sobre este tema a los Congresos de la Asociación Internacional de Puentes y Estructuras en el celebrado en Estocolmo en junio de este año. La Stahlbau-Verband organizó, ya en mayo de 1957, un primer Symposium sobre las uniones con tornillos de alta resistencia.

En la bibliografía que se inserta puede profundizarse algo más en las breves ideas que se han expuesto en este trabajo.

6. Bibliografía

- Association Internationale des Ponts et Charpentiers: Sixième Congrès.—Publication préliminaire.—Secciones II y IIb. Estocolmo, 1960.
- E. Born: Gleitfeste Schraubenverbindungen mit hochfesten vorgenspannten Schrauben. — Manual "Stahlbau", vol. II, ap. 2.3.—Colonia, 1957.
- C. E. C. M.: Note technique B-12-1, Broulou a haute résistance. Bruselas, 1957.
- Deutsche - Stahlbau - Verband: "Gleitfeste Schraubenverbindungen im Stahlbau". — Colonia, 1958.
- Deutsche-Stahlbau-Verband: "Vorläufige Richtlinien für Berechnung, Ausführung und Bauliche Durchbildung von gleitfesten Schraubenverbindungen".—Colonia, 1956.
- A. Dörnen: Kombinierte Eisenbahn -und Strassenbrücke über den Lippe-Seiten Kanal der chemischen Werke Hüls A. G.—Der Stahlbau-27 (1958), 1.

TABLA I

Aceros utilizados en Alemania para los tornillos de alta resistencia

Calidad	Límite elástico aparente, 0,2 %	Tensión de rotura	Alargamiento de rotura	Dureza Brinell mínima (P=30 . D ²)
	$\sigma_{0,2}$ (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	δ %	
6 S	≥ 48	≥ 60	≥ 8	170
8 G	≥ 64	≥ 80	≥ 12	230
10 K	≥ 90	≥ 100	≥ 8	285

TABLA II

**Propiedades mecánicas exigidas en América a los tornillos de alta resistencia
(medidas en probetas obtenidas del mismo tornillo)**

Diámetro del tornillo (Pulgadas)	Límite elástico aparente, 0,2 %	Tensión de rotura	Alargamiento de rotura (medido sobre 2 pulgadas)	Dureza Brinell
	$\sigma_{0,2}$ (kg/mm ²)	σ_r (kg/mm ²)	δ %	
7/8-1	≥ 56,7	≥ 80,9	≥ 14	235 a 302
1 1/8-1 1/2	≥ 54,0	≥ 73,9	≥ 14	223 a 285
1 3/4-3	≥ 38,6	≥ 63,2	≥ 14	183 a 235

TABLA III

Esfuerzo máximo admisible transmitido por cada tornillo

Diámetro nominal del tornillo (mm)	Fuerza de pretensado P _P	Esfuerzo máximo admisible transmitido T _{adm.} (en toneladas)			
	(t)	$\nu = 1,10$	$\nu = 1,25$	$\nu = 1,40$	$\nu = 1,60$
12	4,3	1,76	1,57	1,38	1,23
14	5,9	2,42	2,15	1,89	1,68
16	8,2	3,36	2,99	2,62	2,34
18	9,9	4,06	3,61	3,17	2,82
20	12,8	5,25	4,67	4,10	3,65
22	16,0	6,56	5,84	5,12	4,56
24	18,4	7,54	6,72	5,89	5,24

Esta tabla corresponde a tornillos de calidad 10 K.

Para los tornillos de calidad 8 G se tomarán los mismos valores, multiplicados por 0,7.

TABLA IV

Fuerzas de pretensado en los tornillos y momentos torsores exteriores necesarios para conseguirlas

Diámetro nominal del tornillo (mm)	Sección del núcleo (mm ²)	Fuerza del pretensado (t)	Momento torsor necesario (m . kg)
12	74,3	4,3	9,3
14	102	5,9	15,0
16	141	8,2	23,9
18	171	9,9	32,4
20	220	12,8	46,3
22	276	16,0	63,9
24	317	18,4	80,0

TABLA V

Método «part-torque, part-turn».
Número de vueltas necesario para producir el tensado y la rotura

Diámetro del tornillo (Pulgadas)	Longitud (Pulgadas)	Número medio de vueltas necesarias para lograr el tensado	Número medio de vueltas necesarias para originar la rotura	
			Del tornillo	De la rosca
5/8	2 1/2	5/8	—	2 3/8
5/8	4 1/2	3/4	3	—
3/4	2 1/2	7/16	3	—
3/4	4 1/2	3/4	2 1/2	—
7/8	2 1/2	7/16	3	—
7/8	4 1/2	5/8	—	2 1/2
1	2 1/2	3/8	—	2 1/4
1	4 1/2	1/2	—	2 1/2
1	6 1/2	5/8	—	2
1 1/8	2 1/2	5/16	—	2
1 1/8	4 1/2	1/2	—	2 1/2
1 1/8	6 1/2	1/2	—	2 1/2