

## Uniones híbridas estructurales con adhesivo cianoacrilato

S. GÓMEZ<sup>1</sup>, J. OÑORO<sup>2</sup>, J.P. PECHARROMÁN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dept. Mecánica Industrial. E.U. I.T. Industrial. U. Politécnica de Madrid.

<sup>2</sup>Dept. Ingeniería y Ciencia de los Materiales. ETSI Industriales. U. Politécnica de Madrid.

Nos referimos al estudio de las uniones híbridas estructurales, entendiendo como tales aquellas uniones en las que los elementos de unión tienen como misión principal transmitir las cargas entre adherentes. Concretamente presentamos las denominadas uniones híbridas porque están resueltas mediante la combinación de una unión mecánica convencional (atornillada o remachada) y un adhesivo cianoacrilato. El estudio ha abordado siempre cargas estáticas tanto de tracción como de cortadura, aunque en este trabajo solo se incluyen las primeras. El propósito del trabajo es conocer el funcionamiento de las uniones híbridas, analizando el grado de acoplamiento de los elementos usados en su resolución y, sobre todo, la influencia del adhesivo cuando es incorporado a una unión mecánica convencional. El método usado para el análisis es fundamentalmente experimental, ensayándose uniones puras resueltas con elementos mecánicos (tornillos o remaches) en unos casos y, con adhesivo, en otros. Posteriormente se realizaron los ensayos sobre las uniones híbridas, combinando el adhesivo con el correspondiente elemento mecánico. En todos los casos, el diseño de las probetas y de las propias uniones ha sido analizado en profundidad. Los resultados obtenidos son producto de la comparación del comportamiento de las uniones anteriormente descritas, pudiendo concluir que: si a las uniones mecánicas estudiadas se les añade adhesivo del tipo cianoacrilato, aumentan sensiblemente su resistencia.

*Palabras clave: uniones híbridas estructurales*

### Structural hybrid joints with cyanoacrylate adhesive

This paper deals with the study of structural hybrid joints. The hybrid term is due to the combination of a conventional mechanical joint (screwed or riveted) and a cyanoacrylate adhesive. The main task of the elements of the joints is to transmit the loads from one to another adherent. We have approached the problem of tensile static loads. The objective of the present work is to know the performance of these joints by observing how the elements of the joints operate together and, specially, what is the effect of the adhesive when is incorporated to a conventional mechanical joint. The following joints have been tested: mechanical joints with rivets, mechanical joints with screws, adhesive joints and hybrid joints (mechanical element and adhesive). A wide variety of factors have been considered in the specimens design and, specially, in the joints. Conclusions are obtained from the comparison of the performance of all described type of joints. The most significant conclusion is that if a cyanoacrylate adhesive is used with a mechanical element in a joint, the resistant performance of the joint is rather greater.

*Key words: structural hybrid joints*

## 1. INTRODUCCIÓN

La importancia de conocer el funcionamiento de las uniones adhesivas ha llevado a la realización de numerosos estudios de investigación. En este momento se conocen las ventajas e inconvenientes que presentan éstas frente a las convencionales [1,2], como también es sabido el buen comportamiento que tienen cuando están sometidas a esfuerzos de cortadura, lo contrario ocurre cuando los esfuerzos que aparecen son de pelado [1-3].

Las aplicaciones posibles de las uniones híbridas son muy amplias, ya que muchos de los desarrollos donde se está implementando la utilización de adhesivos, son susceptibles, de utilizar uniones híbridas tanto para reforzar como para facilitar la unión adhesiva. Los buenos resultados obtenidos no solo en fabricación estructural, sino también en la realización de reparaciones [4], hace necesario un exhaustivo estudio de estas uniones.

Hasta la fecha, los trabajos realizados sobre uniones híbridas son escasos y, para algunas uniones en concreto, nulos. Esta situación nos llevó a diseñar y fabricar probetas para poder ejecutar una unión híbrida trabajando a tracción.

## 2. PARTE EXPERIMENTAL

Las uniones ensayadas se han resuelto con tornillos o remaches y un adhesivo cianoacrilato de Loctite.

Los tornillos utilizados son ordinarios de acero, en calidad 5.8. (tensión de rotura 500 MPa, límite elástico 400 MPa) con toda la espiga roscada M.4.

Las tuercas utilizadas son también de acero en calidad 6.8.

Para los ensayos de tracción, se colocaron tornillos con longitud de espiga de 20 mm.

Se han utilizado remaches de acero y de aluminio, ambos de sección tubular.

Los remaches de acero tienen una sección transversal tubular en cuyo interior se aloja el vástago que produce el remachado (cabeza de cierre). El diámetro exterior es de 4 mm y el interior de 2,5 mm, y, por tanto la sección es de 7,7 mm<sup>2</sup>.

Los remaches de aluminio, son también de sección tubular, pero en este caso el diámetro exterior es de 4 mm y el interior de 2 mm y, por tanto, la sección transversal es de 9,42 mm<sup>2</sup>. Como en el caso de los tornillos, se han usado remaches 4 x 20.

En cuanto al adhesivo, se trata del cianoacrilato 480 de la casa Loctite. Es un adhesivo monocomponente de viscosidad media y curado rápido. Su utilización se recomienda en una amplia gama de materiales metálicos. Las principales propiedades del material sin curar son:

- Tipo químico: cianoacrilato de etilo.
- Aspecto: color negro.

Antes del curado tiene comportamiento de líquido newtoniano, es decir, su comportamiento es independiente de la velocidad de deformación.

En condiciones normales, la humedad superficial inicia el proceso de endurecimiento. Este curado continúa durante al menos 24 horas. La velocidad de curado depende de la humedad relativa, del tipo de substrato que se usa, de la holgura de la unión (siendo mayor para pequeñas holguras).

Empieza a perder propiedades a temperaturas en torno a los 80°C, y los espesores de la capa adhesiva deben estar en torno a 0,05 mm.

Debe su tenacidad a la dispersión de caucho de nitrilo que se le añade con este fin.

## 2.1. Descripción de las probetas a tracción

Se trata de probetas de sección circular, fabricadas a partir de una barra cilíndrica de 55 mm de diámetro de la que se cortaron rebanadas de 10 mm de espesor. Estas rebanadas se someten al correspondiente proceso de mecanizado. Así, para obtener la superficie de pegado, se cilindró una parte de la rebanada hasta obtener una zona de 1 mm de espesor y 25 mm de diámetro, dándole un acabado a través de un re-frentado fino que produce una rugosidad de unas  $2\mu\text{m}$ . Así mismo se ejecutan los correspondientes talados que posibilitan el acoplamiento de la probeta al útil de ensayo.

La geometría de las probetas está reflejada en la figura 1.

La composición química del material usado en las probetas aparece en la tabla I.

TABLA I. COMPOSICIÓN DEL ACERO (% EN PESO)

Composición del acero (% en peso)					
Aleación	C	Mn	P	S	Si
Acero no aleado para estructuras metálicas	0,22	1,60	<0,04	<0,04	0,55

Esta geometría presenta una buena rigidez y facilidad en su ejecución.

Para acoplarlas a la máquina universal de ensayos se han diseñado los correspondiente útiles de ensayo.

## 2.2. Descripción y preparación de los ensayos.

Hemos realizado uniones de tres tipos, siendo nuestro objetivo comparar los valores de carga máxima obtenidos cuando dichas uniones trabajan a tracción.

Así, se han estudiado las siguientes uniones:

- Uniones con adhesivos.
- Uniones con elementos mecánicos (tornillos o remaches).
- Uniones híbridas, adhesivo-tornillo y adhesivo-remache.

En todos los casos, la preparación superficial de las probetas a unir ha sido la siguiente: una limpieza mecánica empleando lijas manuales desde 30 hasta 240 con el fin de eliminar óxidos y proporcionar un acabado superficial similar en todas ellas. Posteriormente a esta limpieza se procedió al desengrasado con acetona de las superficies a unir.

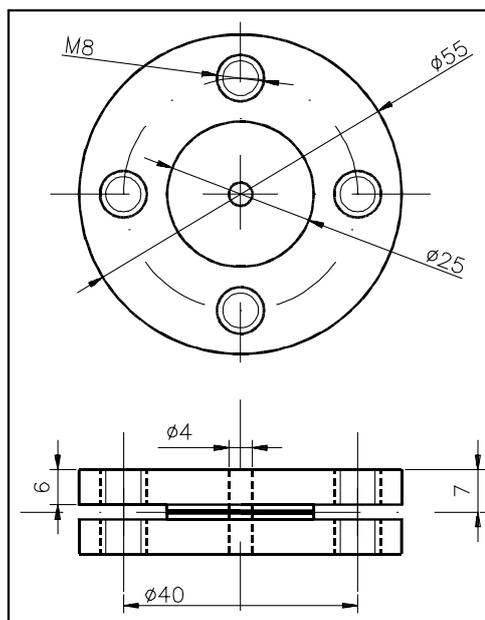


Figura 1: Geometría de la probeta a tracción.

### 2.2.1 UNIONES ADHESIVAS.

Una vez desengrasadas las superficies a unir, se aplicó el adhesivo de forma manual, siguiendo las indicaciones de su ficha técnica. El curado del adhesivo se realizó a temperatura ambiente durante 72 horas.

Con el fin de que el espesor de la capa de adhesivo fuera el mismo, una vez aplicado éste, se apoyaron sobre la superficie adherida pesas calibradas. Uno de los problemas que se presentaron en estas uniones fue el mantener las chapas o pastillas alineadas ya que, hasta que comienza el proceso de curado del adhesivo, las probetas tienden a resbalar. Con el fin de solucionarlo, colocamos las uniones sobre un mármol plano dotado de escuadras y paralelas que mantienen las probetas en posición [5,6].

### 2.2.2 UNIONES CON ELEMENTOS MECÁNICOS.

Para las uniones remachadas usamos remaches de acero y de aluminio. El remachado se realizó siempre con remachadora manual. La fuerza de remachado es la necesaria para romper el vástago del remache y realizar la cabeza de cierre.

En el caso de las uniones atornilladas, existe toda una tecnología de apriete para unir las piezas. Hemos utilizado tornillos y tuercas, produciéndose la unión por aplicación de un par torsor en el sentido de las agujas del reloj de forma que, la cara inferior de tuerca y tornillo hacen contacto con las superficies de las piezas a unir y provocan una fuerza de amarre entre las mismas y una tracción sobre el tornillo.

Los tornillos utilizados son ordinarios y para realizar el apriete hemos adoptado un método mixto entre el denominado "par de apriete" y el denominado "giro de la tuerca". El primero consiste en aplicar un momento torsor "par de apriete" al tornillo (acción a la tuerca y reacción a la cabeza o viceversa). El valor del momento torsor,  $M_t$ , está contemplado en la norma EA-95, siendo:

$$M_t = K \cdot d \cdot N_0$$

donde:

d: diámetro del tornillo.

K: coeficiente de rozamiento a determinar experimentalmente.

$N_0$ : esfuerzo de pretensado.

Este método es recomendable cuando las piezas a unir no están en contacto perfecto. Presenta algunos inconvenientes, como la necesidad de usar útiles de apriete especiales (llaves dinamométricas), la calibración de estos útiles y la posibilidad de romper los tornillos por exceso de apriete.

El método denominado del "giro de la tuerca" es ampliamente utilizado en Norteamérica y, para ser aplicado, es imprescindible que las piezas a unir estén en buen contacto. Se comienza aplicando al tornillo un pequeño par de apriete que produce el contacto entre las piezas; posteriormente se le aplica a la tuerca un giro a que produce en el vástago del tornillo un esfuerzo de tracción y lo lleva cerca de la plastificación. El valor de  $\alpha$  es:

$$\alpha = 90^\circ + t + d$$

donde:

$d$ : diámetro del tornillo en mm.

$t$ : suma de los espesores de las piezas a unir.

Una de las ventajas de este método es la uniformidad que se consigue en el esfuerzo de pretensado. Además es independiente del coeficiente de rozamiento  $K$ .

Para solventar los inconvenientes de ambos métodos, se usa el denominado "método mixto" que consiste en aplicar un par de apriete que lleva a las piezas a unir a un buen contacto (no siendo necesaria una gran precisión en la medida de éste par) y un posterior giro de  $90^\circ$ .

En nuestro caso y, dado que los tornillos usados son ordinarios, se realizaron distintas pruebas con el fin de decidir la magnitud del giro final que debía darse a la tuerca, llegando a la conclusión de que con un giro de  $45^\circ$  es suficiente para obtener un buen apriete sin correr riesgos de rotura en el tornillo.

### 2.2.3 UNIONES HÍBRIDAS.

Para la realización de estas uniones se ha procedido como sigue:

- Alojamiento del remache o tornillo en el taladro practicado al efecto.
- Aplicación del adhesivo sobre la superficie a adherir.
- Remachado o atornillado inmediato siguiendo el procedimiento descrito en las uniones mecánicas.

### 2.3. Tratamiento de datos.

Una vez finalizados los ensayos y obtenidas las gráficas fuerza-desplazamiento de todos ellos, comenzamos el tratamiento de los datos obtenidos.

Cada uno de los ensayos se efectúa sobre grupos de, al menos, seis probetas. El tratamiento de los resultados para todos los grupos ha sido el siguiente:

- Cálculo de la media y desviación típica de los valores obtenidos.
- Definición de un intervalo de aceptación que se fija en 2,5 veces la desviación típica. Los valores que caen fuera del mismo son rechazados.
- Aplicado el intervalo anterior y, con los valores admitidos, se vuelven a calcular media y desviación típica. Redefiniendo de nuevo el intervalo.

## 3. RESULTADOS

En la figura 2 se muestran los valores medios de las cargas de rotura obtenidos, así como un diagrama comparativo de los mismos.

Nos ha parecido interesante presentar estos resultados seleccionando una curva fuerza-desplazamiento de cada uno de los grupos de ensayos, agrupándolas como se muestran en las figuras siguientes.

En la figura 3 se muestran las gráficas fuerza-desplazamiento de las uniones: atornillada, adhesiva e híbrida. El desplazamiento a rotura que presenta el adhesivo es menor que la del elemento mecánico, por tanto, cuando se produce el fallo parcial o total del adhesivo, es el elemento mecánico el que absorbe las cargas de la unión híbrida, hasta rotura.

En la figura 4 se muestran las gráficas fuerza-desplazamiento de las uniones: remachada con remache de acero, adhesiva e híbrida. Comienza funcionando el adhesivo hasta que se produce su fallo total o parcial, en ese momento hay una caída de carga hasta enlazar con la curva fuerza-desplazamiento del elemento mecánico, rompiendo la unión cuando éste alcanza su desplazamiento a rotura.

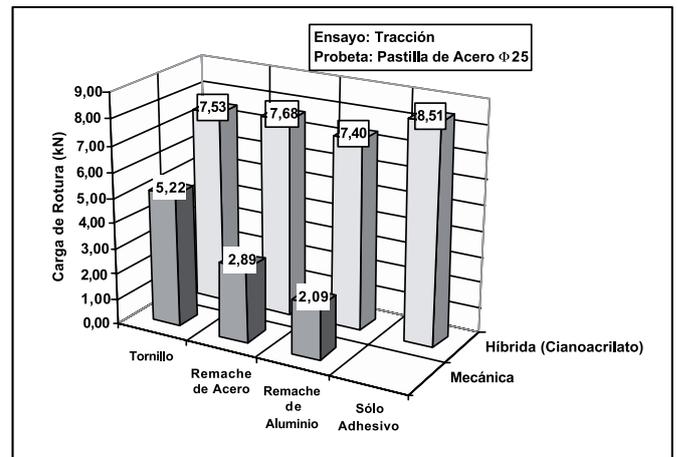


Figura 2: Diagrama comparativo de los valores medios de las cargas de rotura.

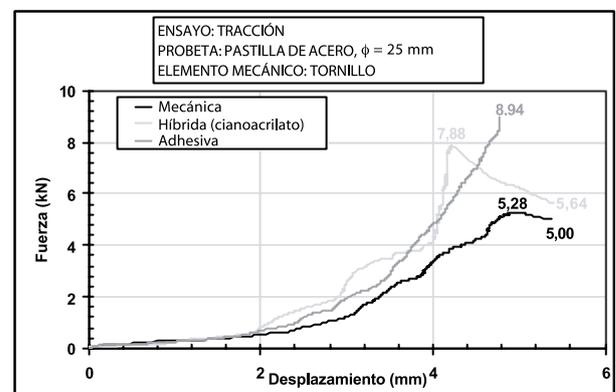


Figura 3: Gráfica fuerza-desplazamiento. Uniones: atornillada, adhesiva e híbrida.

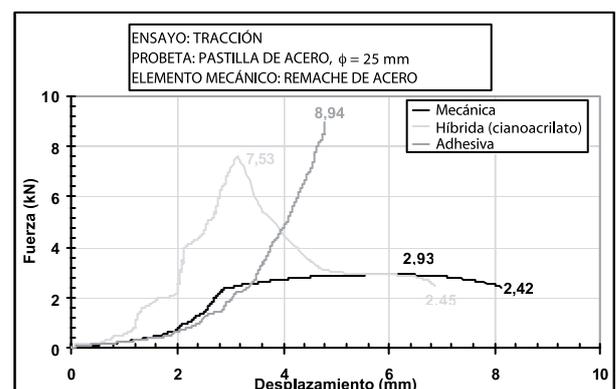


Figura 4: Gráfica fuerza-desplazamiento. Uniones: remachada con remache de acero, adhesiva e híbrida.

En la figura 5 se muestran las gráficas fuerzadesplazamiento de las uniones: remachada con remache de aluminio, adhesiva e híbrida. Como en el caso anterior, comienza funcionando el adhesivo hasta que se produce su fallo total o parcial, en ese momento hay una caída de carga hasta enlazar con la curva fuerza-desplazamiento del elemento mecánico, rompiendo la unión cuando éste alcanza su desplazamiento a rotura.

#### 4. DISCUSIÓN

Existen multitud de factores que influyen en el funcionamiento de la unión adhesiva, tales como: el medio ambiente, métodos de producción, métodos de aplicación, etc. Así, una unión que haya sido diseñada para ser resuelta con elementos mecánicos, puede no ser utilizada con éxito para unir mediante adhesivos sin modificar el diseño y viceversa [1,3].

Como ya se ha dicho, una de las limitaciones para el diseño son los factores medioambientales, con el agravante de que los fabricantes de adhesivos no suelen tener datos sobre las características de deterioro de sus adhesivos en condiciones medioambientales determinadas.

Además en el propio proceso de curado de algunos adhesivos se producen contracciones que pueden generar tensiones residuales en la unión (es el caso de ciertos adhesivos epoxi, que cuando se aplican de forma masiva pueden sobrecalentarse debido a la propia reacción de reticulación) y, de hecho, a veces se degradan cuando curan en grandes espesores[1,3,4]. En nuestro caso, y con el adhesivo utilizado, no hemos detectado este tipo de problemas.

Por otro lado, es difícil predecir la vida en servicio de una unión adhesiva, siendo ésta una de las razones por las que no se usan en exclusividad en uniones estructurales de responsabilidad. El método de estimación de la vida en servicio podría hacerse ensayando prototipos bajo condiciones que acelerasen la degradación de la unión. Aún así, no puede tenerse la certeza de que estas condiciones vayan a aparecer en la aplicación real.

En el caso de la unión de pastillas donde tanto adhesivo como remaches y tornillos trabajan a tracción, se han respetado, en la medida de lo posible, las dimensiones especificadas en las normas referentes a los ensayos de tracción en adhesivos.

A la vista de los resultados se observa que, en algunos casos, las uniones híbridas presentan menores cargas de rotura que las adhesivas correspondientes. Este comportamiento puede justificarse por el posible daño que puede sufrir la capa adhesiva debido a la propia ejecución de la unión mecánica (por la remachadora, en uniones remachadas o por el pretensado en las uniones atornilladas) que puede inducir fisuras en el adhesivo y por tanto, empeorar su comportamiento. Esta hipótesis no ha sido estudiada en este trabajo y sugerimos que se profundice en ella.

#### 5. CONCLUSIONES

1. Los ensayos de tracción se han realizado sobre probetas, las que hemos denominado pastillas, cuyo diseño y proceso de fabricación hemos desarrollado en este trabajo. A la vista de los resultados obtenidos podemos afirmar que tales probetas tienen una rigidez adecuada. Otra de las ventajas que presentan es la facilidad de su ejecución.

2. En todos los casos estudiados, cabría esperar que los valores

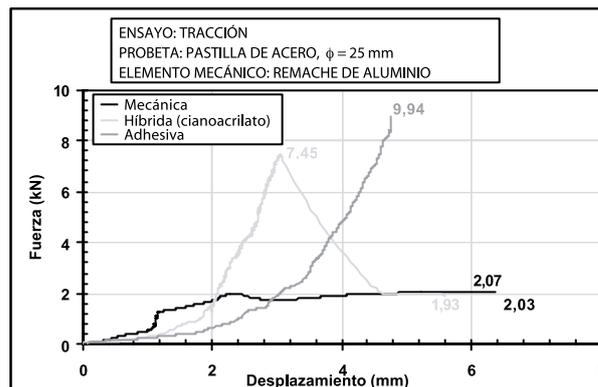


Figura 5: Gráfica fuerza-desplazamiento. Uniones: remachada con remache de aluminio, adhesiva e híbrida.

de cargas de rotura en uniones híbridas fueran, al menos, el máximo correspondiente a los elementos usados para resolverlas. Sin embargo, en los casos en que la unión mecánica presenta mayores cargas de rotura que la adhesiva, las uniones híbridas correspondientes mejoran su comportamiento, mientras que si es la unión adhesiva la que da mayores valores de carga a rotura, las uniones híbridas presentan comportamientos dispares, aumentando las cargas en unos casos (los menos) y disminuyendo en otros (la mayoría).

3. Los valores de las cargas de rotura, en las uniones híbridas, están próximos (por encima o por debajo) al mayor valor de los obtenidos cuando se ensayan los elementos usados por separado, para resolverlas.

4. Si a las uniones mecánicas estudiadas (resueltas con elementos cuyo uso está actualmente extendido en construcciones metálicas) se les añade adhesivos similar al usado en este trabajo, se obtiene un mejor comportamiento desde el punto de vista resistente de la unión frente a sollicitaciones de tracción.

5. El diseño de la unión híbrida será tal que el adhesivo proporcione mejor comportamiento de ésta frente a la corrosión y a las posibles cargas cíclicas. Estas ventajas han sido constatadas en los trabajos previos que hemos consultado. Por otro lado, en la zona de la curva de pendiente creciente, parece ser el adhesivo el que gobierna el comportamiento de la unión híbrida, siendo la unión mecánica la que absorbe las cargas tras un fallo total o parcial del adhesivo.

#### 6. REFERENCIAS

1. R.D Adams, W.C. Wake "Structural adhesive joints in engineering" Publishers, Londres y Nueva York (1986)
2. A.J.Kinloch, "Adhesion and adhesives" Science and Technology Chapman and Hall 1990
3. Alphonsus V. Pocins "Adhesion and adhesives technology" Cincinnati, Hanser-Gardner (1997)
4. R.C. Allan, J. Bird, J.D. Clarke "The use of adhesives in the repair of cracks in ships structures". Structural Adhesives in Engineering, Institution of Mechanical Engineers Bristol, U.K.(1986)
5. J. C. Suárez, F. López "Uniones adhesivas estructurales "Red CYTED VIII D (2000)
6. S. Gómez, J.Oñoro, J.Pecharrmán "Comunicación en Jornadas Nacionales sobre adhesivos" Barcelona (2002)

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03