

Mecanismos de fractura y comportamiento a fatiga en uniones híbridas adhesivo-mecánicas

J. DURÁN¹, R. GARCÍA², C.M. DURÁN¹, J.M. AMO¹, J. OÑORO²

1. Centro Nacional de Investigaciones metalúrgicas (CENIM-CSIC). Dpto. Ingeniería de Materiales. Degradación y Durabilidad.

2. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid (ETSIIIM-UPM). Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales.

Se estudia la influencia en la formación del encastre ("clinchng") del espesor de adhesivo en uniones híbridas a solape, para adhesivos con y sin capacidad de relleno -poliuretanos y cianoacrilatos - en chapas galvanizadas y prepintadas. Los resultados en ensayos estáticos y mecanismos de rotura son también influidos por el espesor de los adherentes. En los análisis de fracturas, realizados por microscopía óptica y electrónica, las características de fatiga son difícilmente observables para los poliuretanos, mostrándose, por el contrario, con bastante evidencia para los cianoacrilatos. Los análisis de los comportamientos en fatiga fueron muy satisfactorios, con límites de fatiga del orden del 40% al 50% de las correspondientes resistencias a carga estática, según los casos.

Palabras clave: Uniones híbridas, adhesivo, autorremachado, fatiga

Fracture mechanisms and fatigue behaviour in hybrid adhesive-mechanic joints

In this work it is studied the influence on the spot clinching formation of the adhesive thickness for hybrid lap joints of adhesives with and without capability of full up -polyurethanes and cyanoacrylates - applied on galvanised and painted sheets. The results of static tests and the mechanisms of fracture are also influenced by the adherents thickness. In fracture analysis, performed with optical and electronic microscopy, fatigue characteristics are very difficult to observe on polyurethanes, but they can be seen, on the contrary, with quite evidence on cyanoacrylates. Fatigue behaviour analysis were very satisfactory, with fatigue limits over the range of 40% to 50% of the respective static resistance, depending on the cases.

Key words: Hybrid joints, adhesive, clinching, fatigue

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico se caracteriza por cambios continuos en los procesos de producción, diseños y conceptos de los productos que se envían al mercado. La combinación de la técnica de adhesivo con la de autorremachado para la unión de materiales ligeros ofrece interesantes propiedades para su aplicación en la industria.

El autorremachado consiste en la introducción de un punzón en las dos chapas que desean unirse. Como consecuencia de la presión aplicada, las chapas se deforman obteniéndose una embutición de las mismas y con ello un punto de unión permanente. Las diferencias entre este sistema mecánico y el sistema de remachado son, en primer lugar, la ausencia de remache, y en segundo, la ausencia de perforaciones en las chapas que se deforman por acción del punzón sin llegar a romperse. Esto conduce a que el autorremache tenga mejor resistencia a la fatiga y a la corrosión que el remache. (1)

Entre las ventajas del autorremache encontramos la posibilidad de unir materiales diferentes (siempre que no existan diferencias galvánicas problemáticas que acelerarían el proceso de corrosión (2)), buenas propiedades de fatiga que, se supone, son consecuencia de los grandes esfuerzos de presión radiales en las juntas autorremachadas, ausencia de calor en el proceso de unión por lo que no produce efecto térmico en el material que une, así como la posibilidad de usar un proceso de control de calidad en la cadena de montaje. (1) Entre las desventajas, la existencia de una deformación en el material hace que exista una concentración de tensiones alta alrededor del punto. En consecuencia, el material se ve afectado lo que puede causar una disminución en sus propiedades físicas. (2) Asimismo, no se crea una junta sellada por lo que el área de solape puede corroerse (1).

La unión con adhesivos es una alternativa a los métodos más tradicionales de unión que suelen ser mecánicos: tornillos, remaches, etc. Su aplicación y desarrollo es cada día mayor, estando su uso ampliamente difundido destacando su papel en la industria del mueble, aeroespacial, automóvil, madera y papel. (2)

Esta técnica de unión puede competir muy bien con otros métodos de sujeción cuando se trata de componentes estructurales sometidos a bajo esfuerzo (3).

Entre sus ventajas cabe destacar que produce el sellado de la junta protegiendo la unión contra la corrosión, es adecuado tanto para materiales metálicos como no metálicos (incluso metales galvánicamente problemáticos), no existe una concentración de tensiones en la junta lo que permite que el material no vea afectadas sus propiedades mecánicas, posee un gran área de transmisión de fuerza y potencia, se realiza sin aporte de calor con lo que no hay efecto térmico sobre el material que se une (1,2). Entre las desventajas cabe citar que la resistencia depende de las condiciones de la superficie del adherente, su proceso de aplicación requiere fijación de las dos partes a unir y en ocasiones el tiempo de curado y manipulación de la unión hace inviable técnica o económicamente muchas aplicaciones (4), su resistencia al calor es limitada y existe una carencia de métodos de control no destructivos que permitan un fácil control de calidad en la cadena de montaje. (1,2)

Combinando estas dos técnicas de unión diferentes, autorremachado y adhesivo, se pretende eliminar muchos de los problemas que estas uniones plantean de forma separada, compensando las desventajas de cada método de unión con las ventajas del otro.

Entre las ventajas inmediatas encontramos la fijación del adherente hasta su curado por el autorremache, el sellado de la junta y la mejor distribución de esfuerzos en la unión (1,3).

La aplicación de la unión híbrida sería interesante en diversos sectores de la industria (automoción, electrodomésticos, madera, mecanismos) siendo aplicable a construcciones de peso ligero que usan chapa fina. (1, 4)

En el trabajo aquí expuesto, que constituye parte de un trabajo más amplio, se estudian las propiedades de uniones híbridas realizadas combinando el proceso de autorremachado con la aplicación de dos adhesivos con distinta capacidad de relleno (2), uno rígido, cianoacrilato y otro flexible, poliuretano. Se analiza el comportamiento bajo cargas de tracción y el mecanismo de rotura de la unión que se ve influido por el espesor del adhesivo, así como el comportamiento bajo carga de fatiga y finalmente se realiza un estudio fractográfico de las uniones (5).

2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

Todos los ensayos han sido realizados bajo normas europeas, EN 1465 (6) para tracción cizalla y EN 9664 (7) para fatiga, con 6 probetas para cada ensayo en los primeros y 7 en los segundos utilizando como método de cálculo para la obtención del límite de resistencia el método de la escalera- con control estadístico de los resultados: sólo se consideraron aceptables las pruebas con coeficientes de variación máximos entre 10 y 15%.

Como material se han utilizado chapas pintadas de 0.62 mm de espesor y chapas galvanizadas de 1 mm con dimensiones 100 x 25 mm. Las uniones fueron realizadas a solape con una longitud de solape de 12.5 mm. Los adhesivos elegidos para la elaboración de las probetas han sido uno rígido con base cianoacrilato y otro flexible con base poliuretano. Se han realizado probetas únicamente con adhesivo, probetas con uno y dos puntos de autorremachado y probetas híbridas.

Todas las probetas se han limpiado previamente con acetona y es de destacar que las probetas galvanizadas a las que se aplica poliuretano requieren además un tratamiento superficial de acondicionador con el objeto de favorecer la adhesión sobre este tipo de material.

El autorremache se ha aplicado directamente sobre las probetas de cianoacrilato sin dar tiempo al secado del adhesivo, mientras que para su aplicación sobre las probetas de poliuretano se ha esperado un tiempo de 30 minutos. Esta actuación se debe a una necesidad operativa ya que la aplicación del punto sobre un adhesivo muy fluido hace que las mordazas de la máquina de autorremachado se impregnen de adhesivo obligando a la continua limpieza de las mismas. La espera de 30 minutos en el tiempo de curado del poliuretano empeora en menos del 10% la resistencia de la unión y supone un importante beneficio en el tiempo de producción de las probetas. En el caso del cianoacrilato no se puede esperar al secado del adhesivo ya que, al ser éste frágil, la aplicación del punto sobre el adhesivo ya curado produce la rotura de la unión adhesiva.

3. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE TRACCIÓN

El valor medio de las tensiones máximas de tracción-cizalla necesarias para producir la rotura del material tanto en probetas pintadas como galvanizadas se recoge respectivamente en las figuras 1 y 2, donde se relaciona la tensión máxima con el tipo de unión realizada.

En todos los casos las roturas fueron cohesivas casi al 100% indicando una adherencia correcta del adhesivo.

A la vista de los resultados podemos observar que la resistencia a la rotura es mayor con dos puntos de autorremachado que con uno para chapas pintadas. Cuando pasamos de uno a dos puntos en probetas sin pegamento se incrementa la tensión resistente un 77%. Vemos, por tanto, que el incremento de resistencia no es aditivo, dos puntos de autorremachado no soportan el doble que uno. Ello se debe a que el esfuerzo se transmite básicamente a través de la base de los puntos, doblando la chapa interna. Con dos puntos queda menos zona resistente en las probetas y la chapa dobla más en el ensayo provocando con ello el desencastre del punto. Por tanto, es el doblado de la chapa la causa del desencastre de los puntos y el motivo de que la resistencia no se duplique al aplicar dos puntos.

Se tiene evidencia de este hecho si comparamos la forma de rotura de los encastres realizados en chapas pintadas con los realizados en chapas galvanizadas. Con las probetas más gruesas (1 mm) de galvanizado (más difíciles de doblar debido a su espesor) encontramos en los ensayos de tracción-cizalla que la chapa interior del punto queda cortada limpiamente y prácticamente sin curvatura quedando la cabeza de los puntos encastrada en la chapa exterior, mientras que en las pintadas más delgadas (0.62 mm), y por tanto, más fáciles de doblar, los puntos no se cortan completamente casi nunca y la cabeza no queda encastrada.

Este efecto del espesor hace que las uniones mixtas en las chapas pintadas sean relativamente menos resistentes y más sensibles al espesor de adhesivo.

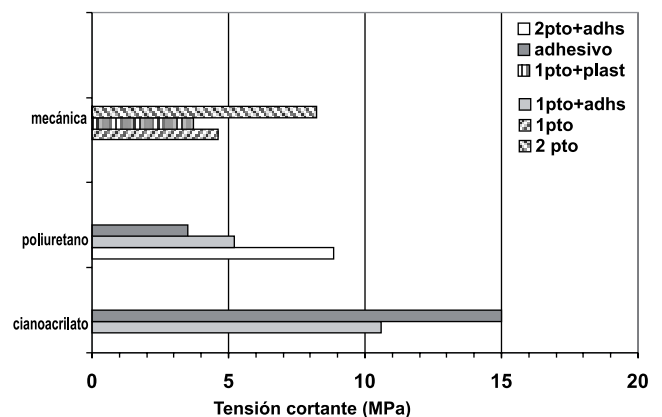


Fig.1: Resistencia a tracción en chapas pintadas: Adhs: adhesivo; Pto: punto de autorremachado; Plast: plástico

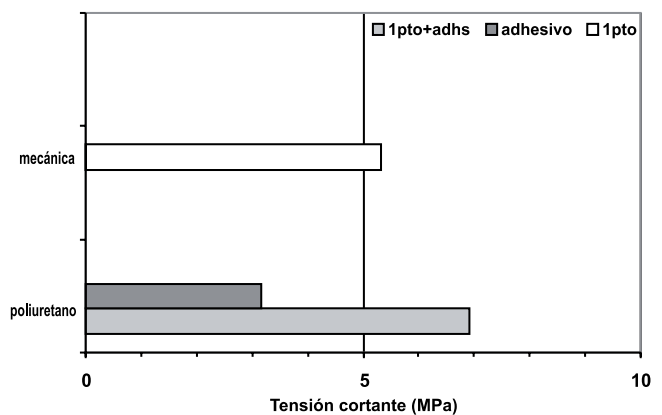


Fig. 2: Resistencia a tracción en chapas galvanizadas: Adhs: adhesivo; Pto: punto de autorremachado

Las figuras 3 y 4 muestran uniones híbridas de poliuretano y cianoacrilato, respectivamente, con dos autorremaches. Se observa el mejor ajuste en los encastres de la segunda unión, ajuste dificultado en la primera por el mayor espesor de la capa de poliuretano. Esta alteración de la geometría del autorremache contribuye a una pérdida de propiedades mecánicas del mismo. Por tanto, el adhesivo perjudica la formación adecuada del autorremache.

A pesar de la influencia negativa de la capa de adhesivo a la hora de realizar el encastre, las uniones mixtas con poliuretano en chapas pintadas mejoran su resistencia a la tracción cizalla en relación con las uniones mecánicas en más del 12% en el caso de un solo remache y en el 7% en el caso de dos. En el caso de chapas galvanizadas la unión híbrida con poliuretano consigue mejorar la resistencia a la cizalla de la unión mecánica aproximadamente en un 25%.

En chapas pintadas, si comparamos las uniones híbridas de poliuretano con las uniones de poliuretano aplicado solo, y dependiendo de los espesores considerados del adhesivo, se puede aumentar la resistencia del pegamento de 2 a 4 veces si se le practica un solo autorremache y hasta 6 veces con dos autorremaches. En chapas galvanizadas, la unión híbrida mejoró la resistencia del adhesivo hasta en un 200%.

La unión mixta con cianoacrilato en chapas pintadas eleva la resistencia del punto sin adhesivo en un 124%. Sin embargo, la pérdida respecto a una unión de cianoacrilato aplicado solo, es del 28%. La explicación a esto habría que buscarla en el propio adhesivo que, al ser muy fluido, emigra de la zona de unión a la hora de aplicar el autorremache. Además el adhesivo es muy sensible a las características de la superficie donde se aplica viéndose afectado negativamente por la deformación de la superficie.

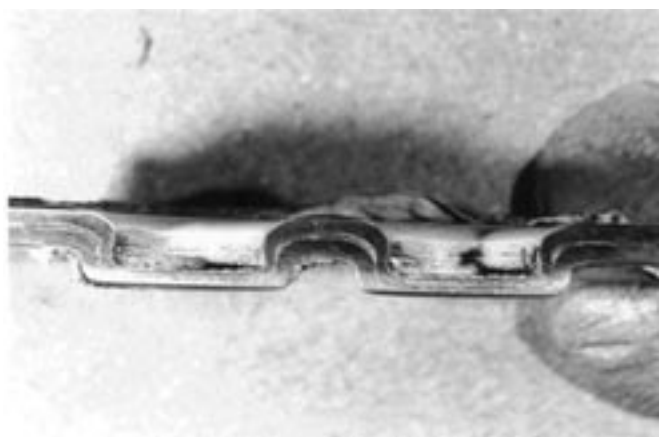


Fig.3 : Unión mixta poliuretano con autorremache

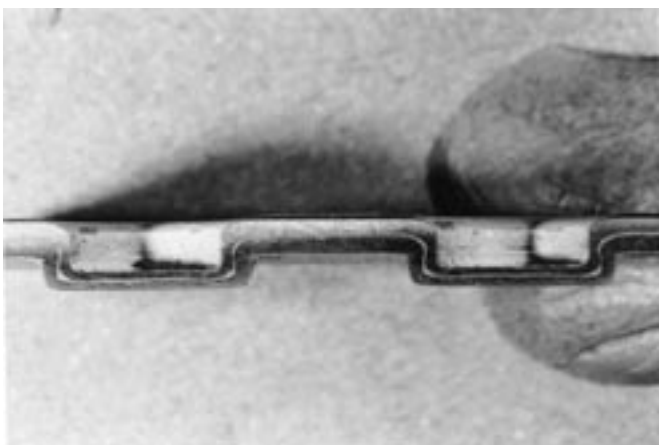


Fig. 4 : Unión mixta cianoacrilato con autorremache

4. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE FATIGA

Se utilizó el método de la escalera o el multiprobeta, determinando el límite de resistencia (F_D) a los 10^6 ciclos y el porcentaje de carga respecto a la resistencia a tracción- cizalla estática (F_R). En las figuras 5 y 6 aparecen los resultados de los límites de resistencia a la fatiga relacionados con el tipo de unión realizada.

A la vista de los datos representados se observa que la resistencia en chapas pintadas a los 10^6 ciclos para el poliuretano es de $F_D = 300$ N ($\tau_D = 0.93$ MPa), mayor del 40% de F_R mientras que para el cianoacrilato el límite de resistencia es de $F_D = 2000$ N ($\tau_D = 5.6$ MPa), del orden del 40% de F_R . En el caso de probetas galvanizadas, el límite de fatiga a los 10^6 ciclos para poliuretano ha sido superior al 50% de la resistencia estática a tracción-cizalla ($F_D = 400$ N) y para cianoacrilato mayor del 30% de la resistencia estática a tracción-cizalla ($F_D = 1030$ N).

Cabe destacar el excelente comportamiento del cianoacrilato a la fatiga cuyo limite de resistencia supera el de la unión mecánica de dos puntos en chapa pintada. Este buen comportamiento de algunos adhesivos a fatiga se debe a que absorben energía mecánica aplicada a la junta y la disipan en forma de calor por lo que se alarga la vida a fatiga en comparación con la de otras uniones como las mecánicas. En el caso de galvanizadas también podemos observar que la resistencia a la fatiga del cianoacrilato supera al de la unión mecánica de un punto.

Para una unión mecánica de un punto en chapas pintadas la resistencia es mayor de un 50% de la resistencia de tracción ($F_D = 1300$ N) siendo la resistencia de dos puntos autorremachados aproximadamente un 45% superior a la de un punto ($F_D = 1900$ N). En probetas galvanizadas las uniones mecánicas de un punto autorremachado

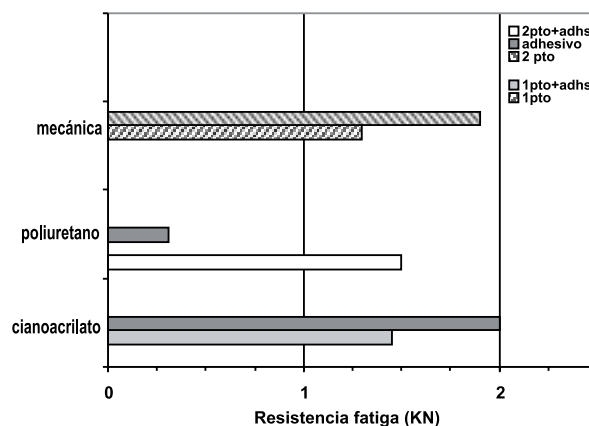


Fig.5: Resistencia a fatiga en chapas pintadas: Adhs: adhesivo; Pto: punto de autorremachado

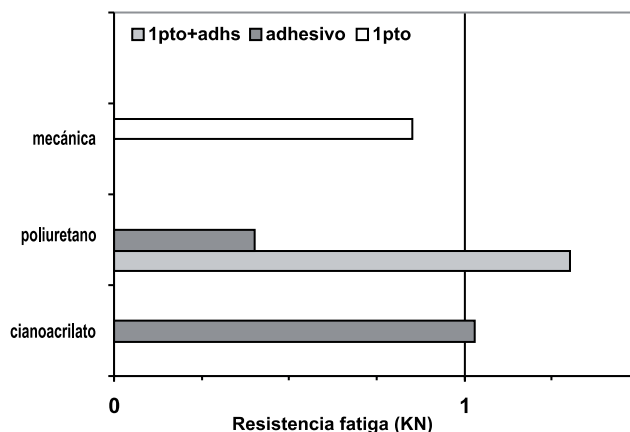


Fig.6: Resistencia a fatiga en chapas galvanizadas: Adhs: adhesivo; Pto: punto de autorremachado

dieron una resistencia del orden del 50% de las mismas equivalentes estáticas ($F_D = 850\text{N}$).

En probetas mixtas pintadas (poliuretano con dos puntos) la carga de fatiga es de aproximadamente el 50% de la resistencia a la cizalladura ($F_D = 1500\text{N}$)

En probetas mixtas galvanizadas (1 punto y poliuretano) la carga de fatiga supera el 62% de la carga estática (F_D mayor o igual que 1300N), no habiendo llegado en la escalera a la zona de rotura después de la séptima probeta.

Comparando los resultados obtenidos con probetas híbridas de chapas pintadas con los obtenidos con probetas a las que solo se les ha aplicado una capa de adhesivo observamos que mientras que la aplicación del autorremachado en el poliuretano favorece su resistencia a la fatiga, en el cianoacrilato la aplicación del punto la empeora ligeramente. Este comportamiento es similar al encontrado en los ensayos de tracción. En el caso de la unión híbrida con poliuretano el adhesivo no se ve afectado negativamente por el autorremache mientras que en el caso del cianoacrilato, la adhesión del mismo empeora por motivos análogos a los ya expuestos.

Comparando los resultados de probetas mixtas pintadas con los de la unión mecánica autorremachada observamos que en el caso del poliuretano con dos puntos comparado con los dos puntos sin adhesivo, el límite de fatiga disminuye al aplicar el adhesivo mientras que en el caso del cianoacrilato aumenta. En el caso del cianoacrilato el punto de autorremachado se ve favorecido por las importantes propiedades de fatiga del cianoacrilato, comportamiento que también se daba en tracción. En el caso del poliuretano el comportamiento difiere del obtenido en tracción donde la aplicación del autorremache sobre el adhesivo conseguía una resistencia de la unión mixta mayor que la de la unión mecánica de dos puntos. Los efectos negativos del poliuretano se deben, como se vio en el estudio macrográfico de las secciones de los puntos, al espesor de la capa de adhesivo que dificulta la correcta conformación del encastre de las chapas al formar el punto. La dificultad es menor en el caso del cianoacrilato debido a los espesores mucho más bajos de este adhesivo (de 15 a 20 veces menores). El punto de autorremache se ve, por tanto, más afectado por la presencia de una capa intermedia en los ensayos de fatiga que en los de tracción debido al tipo de esfuerzo aplicado.

En el caso de probetas galvanizadas comparando los resultados de probetas mixtas de poliuretano de un punto con los de las uniones mecánicas observamos que la aplicación del autorremache sobre el pegamento favorece la resistencia a la fatiga obteniéndose una resistencia mayor que la obtenida cuando se aplica el punto solo o el adhesivo solo. Este efecto es contrario al observado sobre chapas pintadas en las que la resistencia de la unión mixta no consigue superar la de los dos puntos solos. Este efecto puede deberse al distinto espesor de las chapas galvanizadas y pintadas.

Debe comentarse que en el caso de las probetas galvanizadas se realizaron ensayos en los que no se aplicó el tratamiento superficial de acondicionador con vistas a conocer si la aplicación de este tratamiento influía en gran medida sobre la adhesión. Se observó una influencia decisiva del acondicionador que, si no se aplica, da roturas a menos de 2500 ciclos al 35% de F_R . Si comparamos este dato con el de las probetas de poliuretano con acondicionador y roturas cohesivas (caso normal) que dan límites de resistencia de $F_D = 400\text{N}$ ($\tau_D = 1.08\text{MPa}$), superior al 50% de F_R , obtenemos una importante influencia del acondicionador.

5. FRACTOGRAFÍA DE LAS UNIONES

El conocimiento de la morfología de las superficies de fractura resulta fundamental para el conocimiento de cuales han sido los mecanismos de rotura ante un fallo en servicio de una pieza.

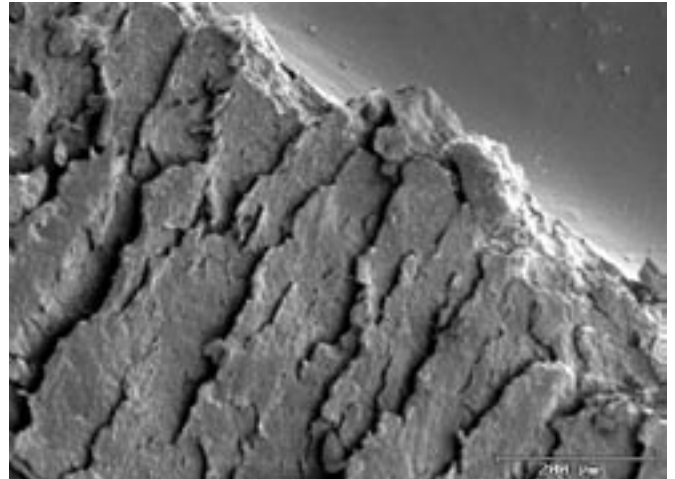


Fig. 7: Borde de burbuja. Planos de rotura en cianoacrilato

En los mecanismos de rotura de las uniones de adhesivos hay que destacar la sorprendente similitud que existe entre la morfología de las superficies de rotura de algunos adhesivos y los metales. Las roturas más características encontradas permiten observar las estriaciones típicas de fatiga en las roturas de cianoacrilato, perfectamente visibles por metalografía óptica, debiendo destacarse que en poliuretano no se muestran estas estriaciones.

Son observables, asimismo, roturas frágiles con zonas de aparentes clivajes y dúctiles con microvacíos en cianoacrilato así como desgarramientos dúctiles en poliuretanos, con amplias zonas de microvacíos, con orientación en la dirección de la rotura.

A modo de ejemplo se muestra una rotura en chapa pintada con cianoacrilato en una unión rota por fatiga que presenta una burbuja. La figura 7 es una zona del borde de la burbuja en la que la rotura frágil nos muestra las facetas típicas de una rotura transgranular sin deformación.

6. CONCLUSIONES

6.1. Tracción

El adhesivo perjudica la formación del punto tanto para poliuretano como para cianoacrilato ya que cualquier capa que se interponga entre las dos chapas a la hora del encastre lo empeora.

Con poliuretano la acción combinada de las resistencias del punto y del adhesivo hace obtener una resistencia a la tracción mayor que la de las dos uniones por separado. Para el cianoacrilato, el adhesivo se ve perjudicado por la acción del autorremachado, lo que hace que la resistencia a la tracción de la unión mixta sea menor que la del adhesivo aplicado solo. Las razones de este comportamiento se encuentran en las propias propiedades del adhesivo que se ve expulsado de la unión por su característica de muy fluido y perjudicado por la deformación de las chapas durante el autorremache a la hora de la adhesión.

La resistencia a tracción cizalla de la chapa con dos puntos de autorremachado no es el doble de la resistencia de un solo punto. Ello es debido a que al tener dos puntos, la superficie resistente disminuye lo que provoca que la chapa se doble con mayor facilidad provocando el desencastre de los puntos en los ensayos de tracción.

6.2. Fatiga

La caracterización por fatiga, ha dado resultados satisfactorios en todos los casos de chapa, pintada o galvanizada, y adhesivo, poliuretano o cianoacrilato. Obtenemos la máxima resistencia a la fatiga con probetas mixtas, probetas de galvanizado con un punto autorremachado y poliuretano que superaron el 60%. Las uniones mixtas con autorremaches superan en todos los casos el 50% de la resistencia estática a tracción-cizalla, independientemente del adhesivo utilizado.

La unión híbrida de poliuretano presenta una resistencia a fatiga mayor que la del poliuretano y, en chapas galvanizadas, mayor que la unión mecánica de un punto, pero no logra superar la resistencia de la unión mecánica de dos puntos en chapas pintadas. Esta diferencia de comportamiento entre chapas galvanizadas y pintadas podría deberse al distinto espesor de las chapas que favorece un encastramiento con más resistencia en galvanizadas. La chapa pintada, con un encastramiento menos resistente, se ve más afectada negativamente por una capa intermedia de adhesivo.

La unión híbrida no consigue alcanzar las resistencias a fatiga o a tracción del adhesivo en el caso del cianoacrilato, sin embargo, este tipo de unión sí presentará una mucho mayor resistencia al pelado y al impacto que el adhesivo, cuyo comportamiento ante estas cargas es pobre, gracias a la acción del punto.

6.3. Fractografía

En los análisis de fracturas, realizados por microscopía óptica y electrónica, son sorprendentes los parecidos entre las superficies de rotura, con las de fracturas metálicas vistas al SEM, presentándose

las típicas características de roturas dúctiles, en microvacíos, orientados según la dirección de las roturas o las típicas facetas frágiles de las roturas transgranulares, sin deformación, de los metales. Las características de fatiga son difícilmente observables para los poliuretanos, mostrándose, por el contrario, con bastante evidencia para los cianoacrilatos.

7. BIBLIOGRAFÍA

1. O. Hahn, A. Peetz. "Improvement of the joint element properties through the combination of mechanical fasteners and adhesive bonding". *Welding in the World*. Vol. 43, N° 3, pp.38-46, 1999
2. A. V. Pocius. "Introduction" pp.1-11., « The chemistry and physical properties of structural adhesives" pp.183-214. *Adhesion and Adhesive Technology: An Introduction*. Hanser-Gardner, Munich 1997
3. L. Budde, y O. Hahn, "Adhesive bonding in combination with spot welding or clinching". *Welding in the World*. Vol. 30, N° 1/2, pp.26-32,1992
4. R. García Ledesma, J. Oñoro, J.M.Amo, C. Durán, J. Durán. "Comportamiento de uniones híbridas autorremachadas con adhesivo poliuretano y cianoacrilato sometidas a cortadura2, pp.1139-1146 en Compendio de Conferencias de Eurocoat 2002, Vol. II: Exposición y congreso internacional de las industrias de pinturas, pigmentos, barnices, tintas de impresión y adhesivos, Eurocoat 2002, Barcelona, 4-6 Junio 2002, Ed. Romargraf, L'Hospitalet de Llobregat, 2002.
5. K. M. Liechti, "Fracture Testing and Failure Analysis" pp.335-348. *Adhesives and Sealants. Engineered Materials Handbook*. Vol. 3. ASM, USA,1990
6. Norma UNE-EN 1465 "Adhesivos. Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas pegadas de sustratos rígidos ", AENOR, España, 1996
7. Norma UNE-EN ISO 9664 "Métodos de ensayo para la resistencia a la fatiga por esfuerzo de cizalla de adhesivos estructurales", AENOR, España, 1996

Recibido: 1.2.03

Aceptado: 30.11.03

