Revista de metalurgia

Comportamiento mecánico de uniones estructurales con adhesivo. Influencia de los parámetros operacionales

J. Durán*, J.M. Amo*, C. Durán*, J. Oñoro** y R. García-Ledesma**

Resumen La influencia de las condiciones operacionales sobre el comportamiento mecánico de las uniones realizadas con adhesivos constituye uno de los temas más controvertidos y principal causa de la disparidad de resultados obtenidos en los ensayos. El estado superficial de los materiales a unir y el espesor de la capa de adhesivo en la unión constituyen dos parámetros fundamentales para un correcto diseño de unión estructural. Adhesivos tipo cianoacrilato y poliuretano aplicados a materiales metálicos galvanizados, aluminizados o prepintados presentan diferencias importantes en la resistencia mecánica de sus uniones, según los parámetros operatorios empleados, que seran analizados en este trabajo. La resistencia mecánica de las uniones está interrelacionada con el modo de rotura producido dúctil-frágil y con el mecanismo cohesión-descohesión, aspectos incluidos en este estudio.

Palabras clave Adhesivos. Parámetros operacionales. Comportamiento mecánico.

Mechanic behaviour of adhesive structural joints. Influence of operational parameters

Abstract The influence of operational conditions on the mechanic behaviour of adhesive joints is one of the most controversial subjects and one of the main causes of the disparity of the results obtained in the tests.The surface condition of the materials being joined and the thickness of the adhesive layer in the joint, are two of the fundamental parameters for the design of the structural joint. Cyanocrylate and polyurethane adhesives applied to galvanized, aluminized and coated metallic materials show important differences in the mechanic resistance of the joints, depending on the operational parameters, which will be analysed in this job. The joint mechanical resistance is interrelated to the fracture mechanism (ductile-brittle) and, on the other hand, to the cohesion-adhesion mechanism, both included in this study.

Keywords Adhesives. Operational parameters. Mechanical behaviour.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización de adhesivos industriales, definidos como materiales aptos para transferir cargas entre los elementos adherentes en condiciones de servicio, como sistema de unión entre componentes metálicos está experimentando un incremento notable en los últimos años, a lo que contribuye la aparición de nuevos productos adecuados, cada vez más, a las necesidades industriales.

En todos ellos, la posibilidad de aplicación industrial requiere el estudio de tres características básicas: aplicabilidad del producto, con especial mención al estado superficial de los adherentes, comportamiento mecánico de la unión, tanto estático como dinámico, y comportamiento en servicio de la unión, en condiciones de calor-frío, alta humedad o inmersión en agua salada y posterior secado.

La realización de una unión óptima, es decir, el adecuado pegado de la misma y el estudio de la respuesta de la unión sometida a envejecimiento bajo condiciones ambientales desfavorables son dos puntos especialmente importantes. Un pegado deficiente, con rotura de tipo adhesiva, podría producir el fallo catastrófico de la unión a un valor de la tensión de rotura muy inferior al estipulado para el tipo de adhesivo que estamos usando. De igual forma, es importante garantizar que las propiedades

(*) Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas (CENIM-CSIC). Dpto. Ingeniería de Materiales, Degradación y Durabilidad. Avda. Gregorio del Amo, 8. 28040 Madrid, España.
(**) Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. (ETSIIM-UPM). Dpto. Ingeniería y Ciencia de Materiales.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

de la unión se mantendrán durante toda la vida útil de la misma sin merma de estas propiedades a causa de los factores medioambientales, efecto que podría conducir, de nuevo, a rotura catastrófica de la unión.

Algunas de las investigaciones de los autores del presente trabajo en el campo de las uniones adhesivas se recogen en este artículo. Como adhesivos se han utilizado poliuretanos y epoxy de uno y dos componentes, adhesivos tipo cianoacrilato y, dada su versatilidad a la hora de su aplicación industrial, los adhesivos sellantes tipo MS [1] de un componente (silanos) que muestran curado más rápido que los sellantes uretanos y curado por humedad. Cabe resaltar, además, como ventaja añadida de estos adhesivos, que no precisan imprimación a la hora de su aplicación, con el consiguiente ahorro de tiempo a la hora de la producción de las uniones con el adhesivo, y que pueden aplicarse sobre muy distintos materiales. Además, la ausencia de disolventes en su composición los hace especialmente atractivos desde el punto de vista medioambiental produciendo un menor impacto medioambiental que otras familias de adhesivos que utilizan disolventes en su formulación.

2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales adherentes utilizados son chapas delgadas, entre 0,5 y 1,2 mm de espesor, en acero galvanizado o con recubrimiento de aleación Al-Zn y chapa prepintada de recubrimiento orgánico. Como adhesivos, se utilizaron familias de cianoacrilato y poliuretano, adhesivos tipo epoxy y adhesivos sellantes tipo MS [2].

Para la aplicación de todos los adhesivos se realizó previamente la limpieza superficial de las superficies metálicas con acetona, con la finalidad de eliminar la contaminación superficial (polvo, aceite, etc.). Posteriormente, los adhesivos epoxy, cianoacrilato y MS fueron aplicados directamente sobre el metal. Antes de la aplicación del adhesivo poliuretano se aplicó a la superficie de todos los materiales metálicos elegidos para este trabajo una capa de acondicionador. Este acondicionador, especialmente formulado para poliuretano, se aplicó posteriormente, también, con los otros adhesivos para conocer el posible efecto sobre la adherencia que sobre los mismos tenía este producto[3].

Las chapas, de dimensiones para todos los materiales metálicos utilizados, de 100×25 mm, se unieron con una longitud de solape de 12,5 mm.

Con la finalidad de observar la influencia del espesor sobre las propiedades físicas del adhesivo se intentaron realizar uniones de distintos espesores para los adhesivos cianoacrilato y poliuretano. El poliuretano, de carácter pastoso, permitió el control del espesor; sin embargo, el cianoacrilato, de carácter líquido, imposibilitó el estudio de esta variable.

Otras variables que se barajaron, con el fin de conocer su influencia sobre las propiedades físicas del adhesivo, fueron la libre expansión durante el curado y la presión. Se realizaron uniones donde el adhesivo curaba bajo presiones de 1 kg a 4 kg. Asimismo, se realizaron uniones en las que el adhesivo podía expandir libremente desplazando en esta expansión las chapas unidas, y uniones en las que las chapas se inmovilizaron para evitar ese desplazamiento.

Una vez realizadas las uniones con los distintos adhesivos se sometieron a ensayos de tracción bajo la norma UNE-EN 1465, a ensayos de fatiga bajo la norma UNE-EN 9664 y ensayos de envejecimiento bajo la norma UNE-EN 29142. Las condiciones específicas utilizadas en este último ensayo serán descritas más adelante en este trabajo.

3. RESULTADOS

Como es conocido, las condiciones superficiales de los adherentes condicionan la resistencia mecánica de la unión.

Algunos adhesivos y sellantes presentan una baja adhesión a ciertos sustratos, debido a la baja energía superficial de la base con respecto al adhesivo. Los acondicionadores pueden añadir una capa, generalmente orgánica, a la intercara, entre adhesivo y adherente, fácilmente absorbida por la superficie del adherente. Los acondicionadores superficiales deben proporcionar al adhesivo una superficie de mejor mojado, permitir la formación de uniones locales en la intercara adherente-adhesivo mediante enlaces químicos o físicos (difusión), y el mantenimiento de esta interfase estable en el tiempo, lo que supone eliminar los bordes de las capas químicamente incompatibles con el adhesivo.

En el presente estudio, el efecto del acondicionador fue muy acusado en uniones sobre material galvanizado y aluminizado y empleo de poliuretano, donde se aprecia un considerable aumento en la resistencia a tracción de las uniones. En las figuras 1 y 2 y a modo de ejemplo se muestra el efecto del acondicionador sobre la superficie del material aluminizado (Algafort). La comparación de las dos

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

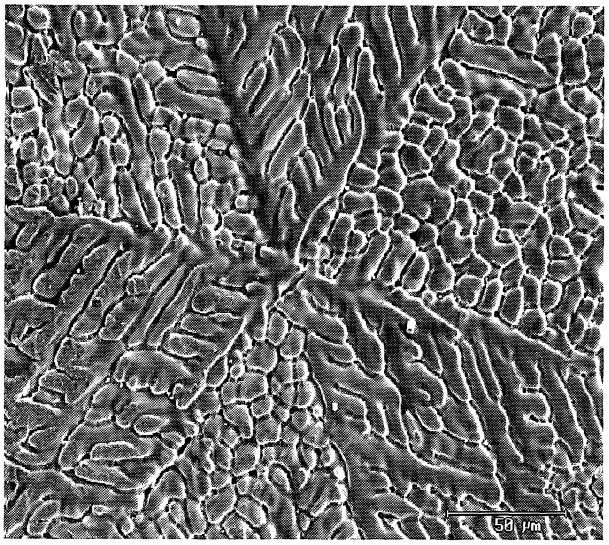

Figura 1. Algafort sin acondicionador.

Figure 1. Algafort without adhesion promoter.

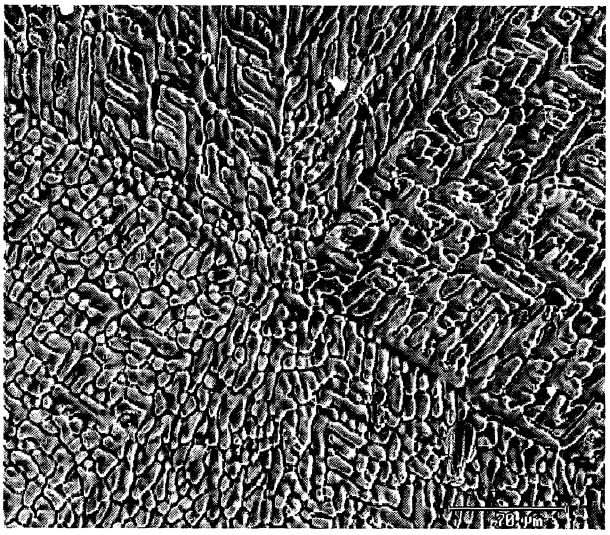

Figura 2. Algafort con acondicionador.

Figure 2. Algafort with adhesion promoter.

micrografías conduce a la observación de un efecto de realce sobre el relieve de la superficie, relieve que pasa a ser más marcado cuando se aplica acondicionador.

En la figura 3 se muestra el incremento producido sobre la tensión de cortadura cuando se utiliza el acondicionador superficial con el adhesivo poliuretano. Vemos el efecto positivo del acondicionador sobre las chapas galvanizadas y aluminizadas. En los adhesivos tipo cianoacrilato y epoxy el efecto del acondicionador presenta menos relevancia.

El espesor de la capa de adhesivo aplicado constituye otro factor importante a tener en cuenta sobre la resistencia mecánica de la unión. A

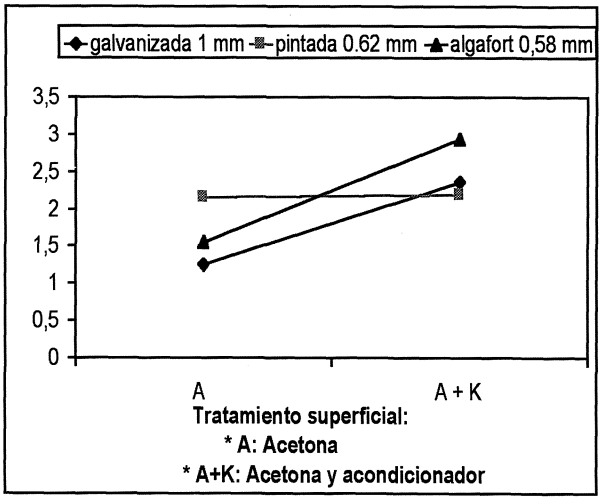

Figura 3. Influencia del acondicionador aplicado a distintas superficies y con poliuretano.

Figure 3. Adhesion promoter influence on different surfaces with polyurethane adhesive.

modo de ejemplo, en la figura 4, se observa este hecho para adhesivos tipo poliuretano con chapas galvanizadas y pintadas.

El comportamiento a tracción-cizalla de las uniones adhesivas ha sido estudiado mediante ensayo de probetas de 25 mm de ancho solapadas en la unión adhesiva 12,5 mm. Cada familia de adhesivos presenta un comportamiento diferente, que se refleja en la obtención de curvas de tracción-cizalla características de cada adhesivo, reproducibles cuando las uniones son de buena calidad, en consecuencia, compactas, sin burbujas o grietas y buena adherencia (porcentaje de cohesividad alto)[4]. En estas curvas se observa, desde la rotura instantánea típica de los epoxy hasta el mantenimiento prolongado de la carga con grandes alargamientos, característica de los cianoacrilatos y poliuretanos. El poliuretano monocomponente, de menor resistencia, cede rápidamente al alcanzar su carga de rotura. A titulo ilustrativo, la figura 5 muestra las curvas características de los adhesivos epoxy y del cianoacrilato.

En condiciones adecuadas de aplicación del adhesivo, las resistencias mayores en solicitaciones a tracción-cizalla se dan con espesores delgados de adhesivo, menores de 0,5 mm para poliuretanos y epoxy y menores de 0,1 mm para cianoacrilatos. Para adhesivos con capacidad de relleno, poliuretanos y epoxy, los valores máximos de resistencia bajan hasta estabilizarse entre 1 y 1,5 mm.

Respecto a las otras dos variables estudiadas, libre expansión y presión, parece que no afectan a la resistencia a tracción de forma definitiva.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

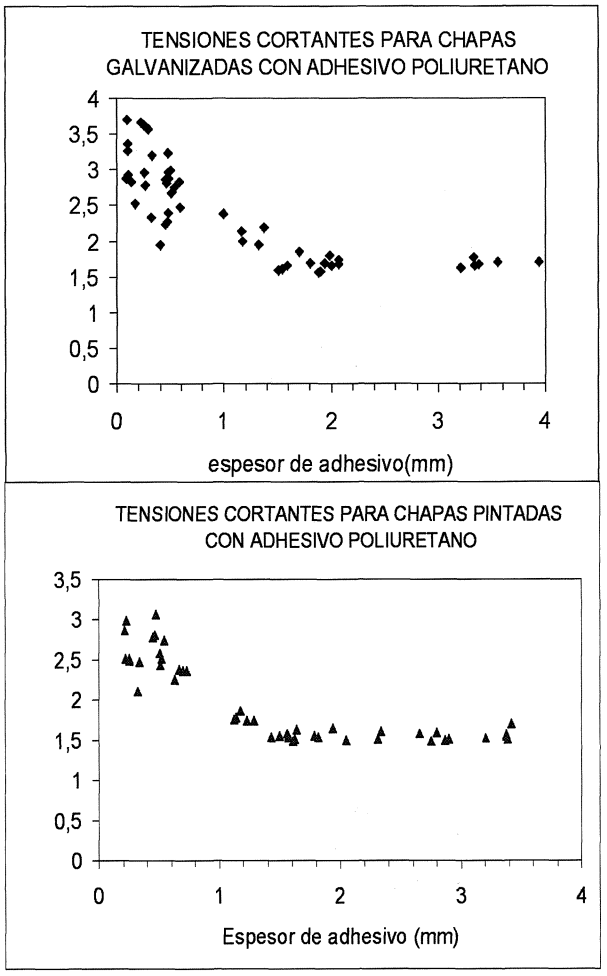

Figura 4. Efecto del espesor del adhesivo poliuretano en la tensión cortante para chapas galvanizadas y pintadas.

Figure 4. Effect of the polyurethane adhesive thickness on tensile strength for galvanized and painted sheets.

Los datos con probetas de igual espesor sometidas a distinta presión (de 1 kg a 4 kg) revelan que en los espesores más bajos la presión no influye de forma apreciable en la resistencia. En cambio, en espesores de 1,2 a 1,6 mm. se revela un ligero aumento de la resistencia a cortadura. Se observa, además, que esta resistencia es independiente del peso aplicado a la probeta ofreciendo resistencias parecidas probetas sometidas a 1 kg y 4 kg.

La fijación de la probeta mientras cura para impedir la expansión del pegamento, también parece favorecer ligeramente la resistencia a tracción para probetas con espesores mayores de 1,5 mm.

Los ensayos de fatiga uniaxial a tracción con $R \cong 0$, realizados bajo la norma europea EN 9664, han permitido comprobar que para 10^6 ciclos, los adhesivos poliuretano alcanzan valores superiores al 40 % de su resistencia estática y superiores al 30 % los cianoacrilatos.

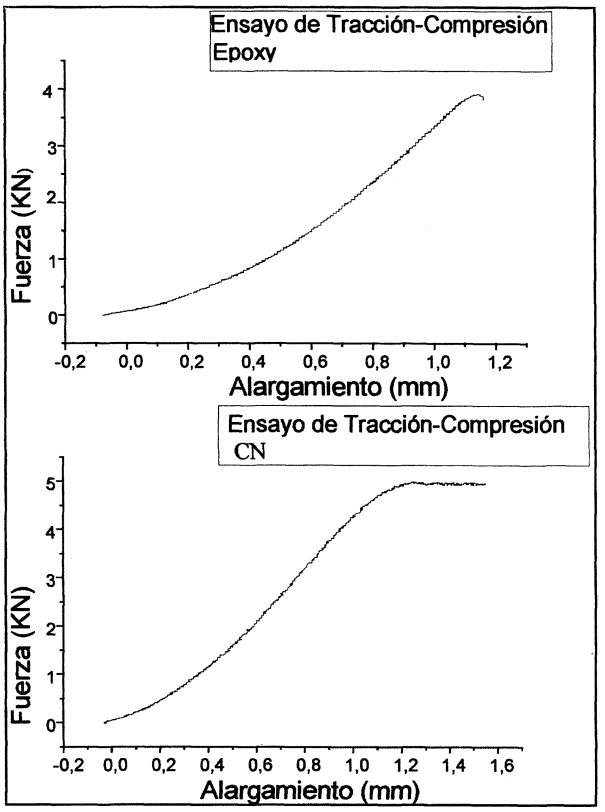

Figura 5. Curvas esfuerzo-desplazamiento para epoxy y cianoacrilato en ensayo de tracción.

Figure 5. Strength-deformation curve for epoxy and cyanoacrylate in a tensile strength test.

La durabilidad de un adhesivo debe considerarse en función de las solicitaciones exigidas y para una vida especificada. En este sentido, los ensayos de envejecimiento acelerado han permitido establecer mediante ciclos de calor y humedad el deterioro de su resistencia mecánica. Con ciclos de 4 semanas de duración (80 °C-100 % HR), la pérdida de resistencia mecánica puede estimarse en el 20% para epoxy y en 15% para poliuretanos.

3.1. Adhesivos MS

Los adhesivos sellantes MS de última generación, dada su facilidad operatoria y reducido tiempo de curado, constituyen una familia de adhesivos con grandes posibilidades de aplicación industrial cuando las solicitaciones mecánicas no resulten excesivas, por lo que se incluyen algunos de los resultados obtenidos en las investigaciones de los autores del presente trabajo.

Los resultados de los ensayos de tracción llevados a cabo 48 h después de la realización de la unión y los de las probetas realizadas en las mismas condiciones y sometidas a ciclos de calor-

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

humedad con 1 y 3 semanas de duración (ciclos 1 y 2 respectivamente) a 40 °C y 100 % HR, seguidos de secado a temperatura ambiente, pueden ser observados en la figura 6.

La comparación de resistencia entre materiales pone de manifiesto un mejor comportamiento de las chapas galvanizadas y aluminizadas sobre las pintadas. No obstante, tras dos semanas de solicitación a ciclo de calor y humedad, el comportamiento de las chapas pintadas es superior al material aluminizado que sufre una pérdida de resistencia.

4. DISCUSIÓN

Hemos visto a lo largo de este trabajo distintas variables operacionales que pueden aplicarse a la hora de producir uniones adhesivas. Algunas de estas variables se revelan como de especial importancia sobre las propiedades mecánicas de los adhesivos.

En concreto, el uso de acondicionador con el adhesivo poliuretano incrementa en alto grado la resistencia a la tracción de la unión adhesiva en chapas galvanizadas y aluminizadas, siendo su efecto no apreciable sobre chapas pintadas. La explicación a este comportamiento se encuentra en el propio acondicionador utilizado, capaz de crear enlaces entre un material orgánico, como es el adhesivo y uno inorgánico, como es el metal. Las chapas pintadas, al estar recubiertas de un medio orgánico, compiten con el adhesivo a la hora de la creación de enlaces orgánicos lo que conduce a una inactivación del acondicionador, que no proporciona efecto alguno sobre la resistencia a la tracción en este tipo de chapas.

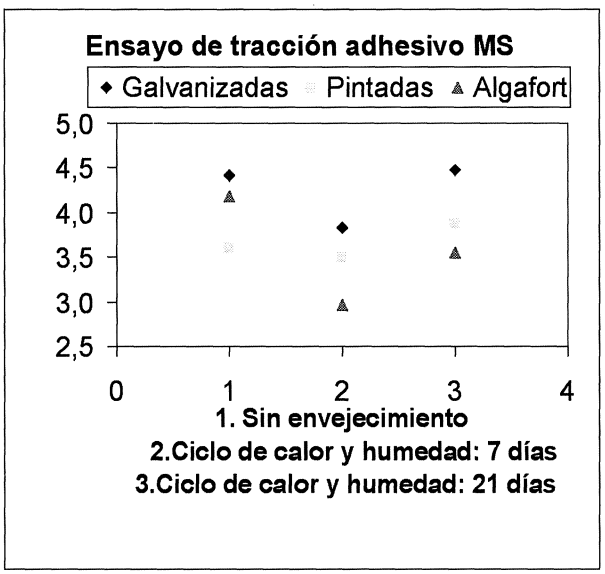

Figura 6. Resistencia a tracción de adhesivo MS en chapas galvanizadas, pintadas y de Algafort sometidas a envejecimiento.

Figure 6. MS adhesive's tensile strength with galvanized, painted and aluminized sheets subjected to durability tests.

En cuanto a la variable espesor, hemos podido comprobar que los espesores menores proporcionan mejores resistencias. Esto, es debido a que, cuando se introducen espesores mayores, la probabilidad de introducir burbujas en el adhesivo es muy alta, lo que afecta a su estructura interna y, en consecuencia, a su resistencia. Además cuando el espesor de adhesivo es mayor los esfuerzos en el borde adhesivo-adherente se vuelven más altos debido a que las cargas se desalinean. Los sustratos deben ser tan paralelos como sea posible lo que requiere uniformidad en el espesor de adhesivo. Si los sustratos no son paralelos la carga no está alineada y esto puede producir esfuerzos de clivaje en el adhesivo, lo que mermará su resistencia. Un espesor de adhesivo alto favorece el movimiento de las chapas de la unión que dejan de ser paralelas.

Sin embargo, a la hora de ver los resultados de los espesores delgados, también vemos que hay una gran dispersión de datos. Una unión muy delgada es difícil de reproducir. Esta dispersión debe ser considerada a la hora de fabricar la unión adhesiva. A veces, puede ser recomendable aplicar un espesor de adhesivo mayor, en el que el comportamiento va a ser más homogéneo.

Las otras variables estudiadas, libre expansión y presión, influyen ligeramente sobre las propiedades mecánicas favoreciendo la resistencia a tracción de las uniones estudiadas a partir de un espesor determinado de, aproximadamente 1,2 mm, siendo el efecto nulo sobre uniones de menor espesor. La explicación a este comportamiento debe buscarse en la propia estructura física del adhesivo. La introducción de una presión, al igual que la introducción de un impedimento al movimiento de las chapas que componen la unión adhesiva, tienen un efecto de compresión sobre el adhesivo, lo que hace que las burbujas internas y poros que quedan en su interior sean menores que cuando se permite al adhesivo expandir libremente. Este menor tamaño de los poros conduce a un aumento de la resistencia del adhesivo, pues este ofrece una estructura más compacta y por tanto más resistente al esfuerzo aplicado. La resistencia a cortadura aumenta más en el caso de aplicación de peso que en el caso de fijación de las chapas debido a la dirección del esfuerzo aplicado. Cuando aplicamos peso, el poro queda aplastado y la zona del mismo de menor superficie es la que queda alineada con la

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es

fuerza de cortadura aplicada. En cambio, cuando se fijan las chapas, se obliga al poro a expandir en dirección perpendicular a la fuerza aplicada ofreciendo este su lado de mayor superficie a la fuerza. En uniones de menor espesor este efecto no se revela. La hipótesis para explicar este fenómeno descansa sobre el hecho de que, en este tipo de uniones la capa de pegamento es tan delgada, que la expansión del mismo queda contrarrestada por el propio peso del material sustrato.

Se ha podido constatar, además, durante los experimentos en cámara climática de los distintos adhesivos, una pérdida real de resistencia mecánica. Sin embargo , en el caso de los adhesivos MS esta pérdida es menos acusada que para otros tipos de adhesivo estudiados. La característica especial de estos adhesivos de ser, además, sellantes, les proporciona una protección adicional contra las condiciones ambientales desfavorables, punto que debería ser tenido en cuenta a la hora de seleccionar un adhesivo que va a trabajar bajo este tipo de condiciones.

5. CONCLUSIONES

Se recopilan parcialmente los resultados mecánicos obtenidos con el empleo de diferentes familias de adhesivos clásicos, con fines de aplicación a la ingeniería estructural, para materiales galvanizados, aluminizados y pintados, principalmente en su comportamiento a tracción y a fatiga, considerando su diferente comportamiento de resistencia y alargamiento a la rotura.

- Los resultados son comparados tras la solicitación de las uniones adhesivas a ciclos de calor y humedad
- Se incluyen resultados sobre la utilización de adhesivos-sellantes, tipo MS (silanos) de novedosa aplicación industrial

Agradecimientos

Los resultados obtenidos en esta investigación han sido recopilados del protocolo de los Programas MAT1998-0970-C02-01 y DPI2002-04007-C02-01 financiados por la Dirección General de Investigación del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

REFERENCIAS

[1] E.M. PETRIE, *Handbook of Adhesives and Sealants*, Ed. Mc Graw-Hill, USA, 2000, pp. 490.

[2] K.M. LIECHTI, *Adhesives and Sealants Engineered Materials Handbook*, vol. 3, ASM International, USA, 1999, pp.75.

[3] A.V. POCIUS, *Adhesion and Adhesive Technology*, Hanser Publisers, Munich,1997, pp.168.

[4] J. DURÁN, R. GARCÍA-LEDESMA, C.M. DURÁN, J.M. AMO Y J. OÑORO, *Mecanismos de Fractura y comportamiento a fatiga en uniones híbridas adhesivo-mecánicas*, VII Congreso de Materiales, Madrid, Octubre 2002.

(c) Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Licencia Creative Commons 3.0 España (by-nc)
http://revistademetalurgia.revistas.csic.es