

## **CAA018 - Comportamiento a fatiga de uniones a solape simple de acero prepintado y galvanizado con adhesivo silano modificado**

R. BERMEJO, J. OÑORO

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales. Universidad Politécnica de Madrid

ETSI Industriales. c/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. España

javier.onoro@upm.es

### **Resumen**

Se ha estudiado el comportamiento a fatiga de uniones adhesivas estructurales a solape simple. Los elementos estructurales fabricados en acero recubierto (galvanizado o pintado) sujetos a fluctuaciones de tensiones y deformaciones pueden fallar después de un número elevado de ciclos. El adhesivo silano modificado (MS) ha sido utilizado para la evaluación de la resistencia mecánica y a la fatiga de uniones de chapa delgada de acero protegido. El objetivo de este trabajo es analizar la influencia del recubrimiento en el comportamiento a fatiga de las uniones adhesivas con silano modificado. Las mejores propiedades se obtuvieron para el acero galvanizado con fallo cohesivo. Los resultados muestran que la compatibilidad química del adhesivo y la capa galvanizada mejoran la adhesión de la unión y la resistencia frente a cargas estáticas y dinámicas. Se ha obtenido el límite de fatiga para las uniones estudiadas.

*Palabras claves:* Unión adhesiva; Silano Modificado; acero recubierto; fatiga.

### **Fatigue behaviour of single overlap joints on painting and galvanized steel with modified silane adhesive**

#### **Abstract**

The fatigue behaviour of single overlap of structural bonded joints was evaluated. Structural components made of thin coated steel (galvanised or painted) subjected to fluctuating stresses and strains may failure after a sufficient number of fluctuations. The modified silane adhesive (MS) has been used to evaluate the static and fatigue resistance of thin coated steel sheet joints. The aim of this paper is analyse the influence of coated on the fatigue behaviour of modified silane bonded joints. The best properties were obtained for galvanised steel with cohesive failure. The results show that chemical compatibility of adhesive and galvanized layer improve adhesion of joints and the mechanical resistance against static and dynamic loads. The fatigue limited has been obtained for joints studied.

*Key words:* bonded joint, modified silane, coated sheet steel, galvanised; fatigue.

## 1. INTRODUCCIÓN

La tecnología de la adhesión, debido al vertiginoso desarrollo de nuevas formulaciones de adhesivos y mejora de las condiciones de utilización, está en pleno crecimiento como método de unión de materiales estructurales, habiéndose introducido en aplicaciones hasta ahora reservadas a otros sistemas de unión como la soldadura o las uniones mecánicas. El desarrollo de las uniones adhesivas se debe a las ventajas que presenta con respecto a otros sistemas de unión: mejor distribución de las tensiones, evitando áreas de alta concentración de esfuerzos; uniones más rígidas; no producen distorsión del sustrato, al no ser necesario el calentamiento, o la deformación de las piezas; al no requerir importantes aportes de calor, como la soldadura, no produce modificaciones microestructurales indeseables, ni deteriora los recubrimientos protectores de metales de bajo punto de fusión o de naturaleza orgánica. Los adhesivos permiten la unión de distintos materiales con diferentes propiedades físicas, mecánicas o electroquímicas. También, pueden actuar como selladores consiguiendo, de esta forma, uniones mecánicas estancas, pudiendo evitar la entrada de agentes corrosivos (humedad, aire, etc.) [1,5]. El empleo de uniones adhesivas puede suponer una disminución de los costes de manipulación y almacenamiento, así como una aceleración de los procesos de ensamblaje y, como consecuencia, un aumento de los procesos de producción, debido todo ello a la reducción del número de componentes tales como los tornillos, remaches, abrazaderas, etc.[3,6].

Los mecanismos de adhesión entre diversos materiales son complejos. En general, cada unión adhesiva solo puede explicarse considerando la actuación conjunta de varios mecanismos de adhesión [7]. No existen adhesivos universales para un determinado material o aplicación, por lo que cada pareja sustrato-adhesivo requiere un particular estudio de cómo se realiza la unión y el comportamiento obtenido puede variar, significativamente, de uno a otro caso [1].

La chapa fina de acero prepintado tiene diversas aplicaciones: automoción, construcción, línea blanca y marrón, etc. La unión de estos materiales se realiza habitualmente mediante remachado, aunque para determinadas aplicaciones se ha sustituido por uniones adhesivas, ya sea total o parcialmente (uniones híbridas), que permiten, en muchos casos, aunar las ventajas de ambos sistemas de unión [8]. La naturaleza química de la pintura y el tipo de adhesivo tienen un efecto fundamental en las propiedades de la unión, debido principalmente a la compatibilidad química y electroquímica de los dos materiales responsables de la unión [9]. Es, por tanto, necesario identificar los adhesivos más idóneos para cada tipo de pintura o recubrimiento utilizado.

El proceso de galvanizado consiste en recubrir con zinc la superficie del acero para protegerlo de la corrosión. La razón de utilizar zinc y no otro metal como recubrimiento, se debe a gran capacidad de este elemento para proteger el acero. Existen diferentes métodos para la obtención del acero galvanizado, los más utilizados son la inmersión en caliente y el galvanizado electrolítico.

Los adhesivos de silano modificados (MS) son adhesivos/selladores elásticos basados en poliéteres terminados con grupos siloxanos. La reacción de polimerización sucede a través de los grupos siloxano terminales, iniciada por la humedad ambiental o la adición de un segundo componente. Como subproducto de reacción se genera metanol en baja concentración, lo que

minimiza los olores. La reacción de curado es una policondensación que sucede en dos etapas: liberación de los grupos extremos y entrecruzamiento de los pre-polímeros [3]. Los adhesivos silanos modificados ofrecen importantes propiedades ya que generan uniones resistentes al descuelgue y presentan buena adhesión y sellado sin necesidad de utilizar imprimaciones sobre una amplia variedad de sustratos, incluyendo la mayoría de los polímeros; poseen gran capacidad de relleno de holguras; tienen una buena resistencia a la radiación UV y a los productos químicos; presentan viscosidades bajas antes del curado, lo cual facilita su dosificación; permanecen flexibles entre  $-40^{\circ}\text{C}$  y  $100^{\circ}\text{C}$ ; son compatibles con los sistemas de pintura comúnmente utilizados; el tiempo de curado puede ser acelerado incrementando la temperatura y la humedad; no contienen solventes, isocianatos, siliconas y PVC. Sin embargo, este tipo de adhesivos inhiben el curado de los poliuretanos debido a que generan metanol durante su curado.

La rotura por fatiga es una forma de fallo de los materiales, que se produce cuando están sometidos a la acción de cargas o vibraciones fluctuantes [11]. Las uniones y estructuras sometidas a fatiga pueden fallar a niveles de carga por debajo del límite de resistencia estática del material. El fallo por fatiga ocurre súbitamente, sin deformación previa. La fatiga se produce por una acumulación de daño en el material que va debilitándolo siendo, en la mayoría de los casos, un proceso de iniciación y propagación de grietas. El tiempo que el material permanece en servicio antes de producirse el fallo está determinado por el nivel de tensiones y la frecuencia de los ciclos de carga. El análisis se realiza mediante la obtención de las curvas de tensión frente al número de ciclos hasta el fallo del componente, curvas SN o curvas de Wöhler, que permiten realizar una estimación de la resistencia a la fatiga de un determinado material o estructura. Los ensayos de fatiga realizados mediante ciclos predeterminados de carga sinusoidales, de amplitud y frecuencia constantes, permiten caracterizar el comportamiento a la fatiga por el número de ciclos hasta la rotura, siendo el límite de fatiga el valor al que tiende la tensión cuando el número de ciclos es muy grande. En algunos materiales, la fatiga no tiende a un valor límite sino que decrece de forma constante a medida que aumenta el número de ciclos. Para estas situaciones, se define la resistencia a la fatiga (o límite de resistencia) por la tensión en que se produce la rotura para un número de ciclos predeterminado [12].

En este trabajo se estudia el comportamiento a fatiga de uniones realizadas con adhesivo silano modificado (MS) en chapas de acero al carbono recubierto con dos tratamientos superficiales diferentes. La evaluación de su resistencia a la fatiga se ha comparado con su resistencia mecánica a cizalladura simple y la forma de fallo de la unión.

## 2. MATERIALES Y TÉCNICA EXPERIMENTAL

Los sustratos utilizados han sido: acero al carbono laminado con recubrimiento orgánico poliéster-epoxi (proporción 1:1) de espesor 0,8 mm, con un espesor de recubrimiento de 0,03 mm de color gris según normativa EU 10169 [13], y acero al carbono laminado galvanizado por inmersión en caliente de espesor 1,4 mm, fabricado según la norma EN 10142 [14].

Todas las muestras fueron cortadas por cizalla en piezas de 100x25 mm. La superficie de las muestras se limpió con papel industrial impregnado en acetona para eliminar posibles contaminantes superficiales como grasa y suciedad. Posteriormente se dejaron secar las muestras al aire antes de aplicar el adhesivo. Este sistema de limpieza ha resultado ser rápido, económico y no ha producido ninguna alteración significativa en las características de las superficies tratadas.

El adhesivo utilizado ha sido un adhesivo/sellador elástico en base a polímero de silano modificado Terostat MS 939. Las uniones han sido realizadas a solape simple, con una zona de unión de 25x12,5 mm. El adhesivo se ha aplicado sobre la superficie de uno de los sustratos inmediatamente antes de realizar la unión. El tiempo de curado ha sido de un mínimo de siete días. Durante este tiempo se ha mantenido una presión constante sobre las uniones.

Se han realizado ensayos de cizalla por tracción en probetas a solape simple hasta rotura para determinar su resistencia y programar las cargas aplicadas en los ensayos de fatiga. Se han ensayado seis muestras para cada acabado superficial. Estos ensayos se han realizado según lo recogido en la norma UNE-EN 1465 [15]. Los ensayos se han realizado en una máquina universal de ensayos electromecánica INSTRON 1362.

Los ensayos de fatiga se han realizado sobre uniones a solape simple, similares a las utilizadas en los ensayos de cizalladura por tracción, según lo dispuesto en la norma UNE-EN ISO 9664 [16]. Para estos ensayos se ha utilizado una máquina universal de ensayos hidráulica MTS 810. Los ensayos de fatiga han consistido en la aplicación de un ciclo sinusoidal tensión-tensión con una relación de tensiones:  $R = 0,1$ . La frecuencia de los ensayos ha sido de 5Hz. Se han llevado a cabo ensayos de fatiga a diferentes valores de carga, determinándose el número de ciclos hasta rotura de cada muestra ensayada. La tensión máxima, en todos los ensayos, ha estado comprendida entre el 30% y el 70 % de la tensión de rotura obtenida en los ensayos de cizalladura por tracción. Los ensayos se han realizado a temperatura ambiente (22 °C). El número máximo de ciclos aplicado ha sido de  $10^6$ . Se han ensayado cuatro probetas para cada nivel de tensión analizado.

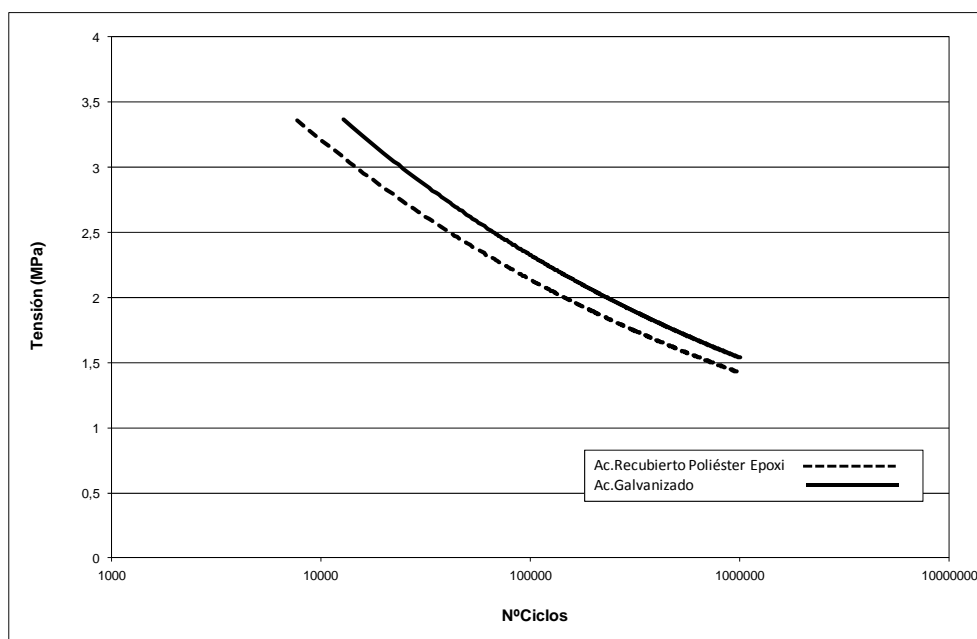
### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos de cizalla por tracción se han recogido en la Tabla I. En ella puede verse como los ensayos sobre muestras prepintadas han alcanzado valores superiores a los conseguidos en las uniones sobre acero galvanizado. Un alto porcentaje de fallo adhesivo hubiera señalado que no se habían conseguido unas buenas condiciones de adhesión, ya fuera por una baja interacción entre el sustrato y el adhesivo o por una inadecuada preparación superficial previa a la aplicación del adhesivo. La elección de una adecuada preparación superficial es fundamental para lograr las mejores condiciones de adhesión [16,17]. El alto porcentaje de rotura cohesiva obtenido ha permitido utilizar un sistema de preparación superficial previo a la aplicación del adhesivo muy sencillo, esto ha permitido estudiar el comportamiento de los aceros recubiertos en su estado de recepción, evitando los encarecimientos inherentes a cualquier proceso adicional de preparación superficial.

**Tabla I.** Valores medios del ensayo de cizalladura a solape simple.

	<b>Tensión Rotura (MPa)</b>	<b>Rotura Cohesiva (%)</b>	<b>Curado (Días)</b>
<b>Acero Prepintado</b>	3,84	94	7
<b>Acero Galvanizado</b>	3,62	93	7

En la Figura 1 se muestran las curvas de tensión máxima aplicada frente al número de ciclos hasta la rotura (curvas SN), donde se pueden comparar los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga de las probetas ensayadas. Como se puede observar, conforme disminuye la tensión de rotura aumenta el número de ciclos de carga hasta llegar a rotura, como es característico en las curvas SN. El número de ciclos para rotura aumenta considerablemente cuando la tensión máxima desciende por debajo del 50 % de la tensión de rotura a cizalladura por tracción. En el diagrama, también se puede ver el valor de la tensión máxima que es capaz de soportar la unión sin fallar después de  $10^6$  ciclos de carga, según se recoge en la norma UNE-EN ISO 9664 [18]. Las probetas de acero recubierto de poliéster epoxi y las de acero galvanizado presentan, en general, una buena resistencia a fatiga. Aunque se aprecia un comportamiento paralelo para ambos recubrimientos, son las probetas de acero galvanizado las que poseen mejor comportamiento a fatiga. Los valores medios del límite de resistencia a la fatiga sin que se haya alcanzado la rotura han sido para tensiones máximas de: 1,10 MPa para acero recubierto de poliéster epoxi y 1,20 MPa para acero galvanizado. Estos valores medios representan aproximadamente, el 28,6% en el acero recubrimiento de poliéster epoxi y el 33% en el acero galvanizado. Ninguna de las muestras ensayadas presentó rotura por fatiga por debajo del 25% de su resistencia a cizalladura por tracción.

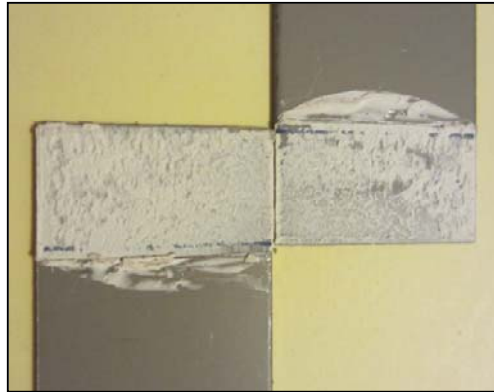


**Figura 1.** Curvas SN (Tensión-Nº de ciclos) de acero prepintado y galvanizado.

Según se puede apreciar en la Tabla II, los valores medios de porcentaje de rotura cohesiva en los ensayos de fatiga han sido: 66% chapas con recubrimiento de poliéster-epoxi, y 73% para chapas de acero galvanizado. Esto ha supuesto una disminución del porcentaje de rotura cohesiva obtenido para las muestras ensayadas a cizalladura por tracción, que eran superiores en ambas superficies al 90%. Así mismo, muestran que la mayor resistencia a la fatiga del acero galvanizado parece estar relacionado con su mayor porcentaje de rotura cohesiva. En las Figuras 2 y 3 pueden verse muestras rotas por fatiga con un alto porcentaje de rotura cohesiva en acero prepintado y galvanizado respectivamente.

**Tabla II.** Valores medios del ensayo de fatiga.

	Tensión Rotura (MPa)	Rotura Cohesiva (%)	Curado (Días)
<b>Acero Prepintado</b>	3,99	99	7
<b>Acero Galvanizado</b>	4,37	93	7



**Figura 2.** Acero Prepintado con un 98 % de rotura cohesiva.



**Figura 3.** Acero Galvanizado con un 98 % de rotura cohesiva.

Las muestras ensayadas por fatiga que no llegaron a romperse después de  $10^6$  ciclos de carga fueron sometidas a ensayos de resistencia residual, los resultados obtenidos dan valores similares a los de los ensayos de cizalladura por tracción, lo que nos dice que las muestras no han sufrido un debilitamiento de la unión durante los ensayos de fatiga realizados. El análisis de estas muestras, junto con las muestras rotas ensayadas por fatiga permiten identificar que la rotura por fatiga no se ha producido por un proceso de iniciación y crecimiento de grieta de forma estable. El proceso de fatiga va debilitando la unión hasta que llega un momento que produce su rotura de forma muy rápida. Este mismo proceso de rotura por fatiga también ha sido observado en uniones con otros adhesivos sometidas a condiciones de fatiga [19].

#### 4. CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento a fatiga de uniones adhesivas con silano modificado de aceros al carbono recubiertos con pintura poliéster-epoxi y acero al carbono galvanizado ha conducido a los siguientes resultados:

1. Se han obtenido las curvas SN del comportamiento a fatiga de las uniones adhesivas. Las mejores propiedades se han obtenido en las uniones realizadas sobre acero galvanizado.
2. Se ha obtenido el valor del límite de resistencia máxima a fatiga, sin que se produzca el fallo de la unión, después de  $10^6$  ciclos de carga: 1,10 MPa para recubrimiento de poliéster epoxi y 1,20 MPa para acero galvanizado. Estos valores límites representan aproximadamente, el 28,6% de la tensión de rotura en el acero recubrimiento de poliéster epoxi y el 33% en el acero galvanizado.
3. Los porcentajes de rotura cohesiva en los ensayos de fatiga han sido: 66% para aceros con recubrimiento de poliéster-epoxi, y 73% para acero galvanizado. La mayor resistencia a la fatiga del acero galvanizado parece estar relacionado con su mayor porcentaje de rotura cohesiva.
4. La utilización de adhesivos silanos modificados en la unión de aceros prepintado y aceros galvanizados, permiten obtener uniones estructurales con buena resistencia a la fatiga, cuando los valores de la carga máxima de fatiga son inferiores al límite de fatiga, que en todos los casos analizados es superior al 25% de la carga máxima obtenida en los ensayos de cizalladura por tracción.

#### BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Cognard. Adhesives and Sealants. Basic Concepts and High Tech Bonding, Ed. Elsevier. Oxford, UK (2005)
- [2] Loctite, Worldwide Desing Handbook, Ed. Loctite, Munich (1995)
- [3] M. Madrid, Tecnología de la Adhesión , Ed. Loctite, Madrid, (2002)
- [4] B. Duncan, S. Abbott, R. Court, R. Roberts and D. Leatherdale, A Review of Adhesive Bonding Assembly Processes and Measurement Methods, Ed. National Physical Lab. Teddington, Middlesex, UK, (2003)
- [5] C.A. Dostal, Adhesives and Sealants (Engineered Materials Handbook) Ed. CRC Press, New York (1990)
- [6] A.V. Pocins, Adhesion and Adhesives Technology. Ed. Hanser-Gardner, Cincinnati, 1997.
- [7] J.M. Martín Martínez, Adhesión y uniones adhesivas, Ed. Universidad de Alicante (1998)
- [8] S. Gómez et al, Int. J. Adhes. Adhesives 27, 263 (2007)
- [9] E.M. Petrie, Handbook of Adhesives and Sealants Ed. McGraw Hill, New York (1999)



- [10] Acelor, Guía de utilización Productos de acero con recubrimiento metálico, Ed. Acelor, Luxemburgo (2006).
- [11] R. Houwink y G. Salomon, Adherencia y adhesivos, Ed. Urmo, Tomo I, Bilbao (1978)
- [12] H. Hadavinia et al, Int. J. Adhes. Adhesives 23, 449 (2003)
- [13] EU 10169, Productos planos de acero recubiertos en continuo de materiales orgánicos (precalentados). Ed. AENOR, 2011.
- [14] EN 10142, Bandas (chapas y bobinas) de acero bajo en carbono, galvanizadas en continuo por inmersión en caliente para conformación en frío. Ed. AENOR, 2001
- [15] UNE-EN 1465, Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de montajes pegados solapados. 2009.
- [16] J. Duran, J., et al, Rev. Metal. Madrid, Vol. Extr. , 345 (2005)
- [17] P.R. Underhill, D.L. Duquesnay, Int. J. Adhes. Adhesives 26, 62 (2006)
- [18] UNE-EN ISO 9664, Métodos de ensayo para resistencia a la fatiga por esfuerzo de cizalla de adhesivos estructurales. 1996.
- [19] R. Bermejo, J. Oñoro y R. Gracia-Ledesma, Rev. Metal. Madrid, Vol. 44 (4), 310 (2008)