

COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE UNIONES ROSCADAS

B. González¹, J.C. Matos², F.J. Ayaso¹, J. Toribio¹

¹ Ingeniería de Materiales (Universidad de Salamanca),
E.P.S., Campus Viriato, Avda. Requejo, 33,
49022 Zamora. España.
Correo-e: bgonzalez@usal.es

² Departamento de Informática y Automática (Universidad de Salamanca),
E.P.S., Campus Viriato, Avda. Requejo, 33,
49022 Zamora. España.
Correo-e: jcmatos@usal.es

RESUMEN

En este trabajo se han ensayado uniones atornilladas sometidas a sollicitaciones monótonas crecientes y a fatiga en control de carga, empleando intervalos de oscilación de tensiones constantes con distintos valores del factor R . Algunas de estas probetas se han sometido a una precarga de tracción de forma previa a la aplicación de la carga cíclica. Los resultados muestran que en sollicitación monótona creciente la unión roscada no es la zona de fallo del tornillo, mientras que sí lo es para carga cíclica. La vida en fatiga disminuye con el aumento del intervalo de oscilación de tensiones y con la tensión máxima, y la precarga aumenta la vida en fatiga para intervalos de oscilación de tensiones pequeños. La superficie de fractura por fatiga muestra una geometría de *luna creciente* para fisuras cortas que evoluciona hacia frentes de fisura casi rectos para fisuras largas. La fractura por fatiga normalmente ocurre en el fondo del primer filete del tornillo que está dentro de la unión roscada, aunque puede existir iniciación en varios filetes consecutivos, aumentando el ángulo de iniciación de la fisura en fatiga con la disminución de la tensión aplicada.

ABSTRACT

In this work, bolted joints were tested under both monotonic tensile loading and fatigue, in the latter case using constant stress amplitude with different values of the R ratio. Some of the specimens were subjected to a tensile (monotonic) pre-loading before the fatigue (cyclic) loading. Results show that under increasing monotonic tensile loading the bolted joint is not the failure zone of the bolt, whereas such a bolted joint is the failure region under cyclic loading. The fatigue life decreases with the increase of the stress range and with the maximum stress, and pre-loading enlarges the fatigue life for small stress ranges. Fatigue fracture surface shows a geometry of *increasing moon* in the case of short (shallow) cracks and such a shape evolves towards a quasi-straight crack front in the case of long (deeper) cracks. Fatigue fracture usually happens at the root of the first notch inside the bolted joint, although fracture initiation may happen in several consecutive notch roots, increasing the initiation angle of the fatigue crack as the applied stress diminishes.

PALABRAS CLAVE: Uniones roscadas, Vida en fatiga, Fisuración por fatiga.

1. INTRODUCCIÓN

En muchas ocasiones las uniones roscadas resultan ser las zonas más débiles en estructuras o en mecanismos, por lo que conocer su comportamiento resulta clave cuando se someten a una carga monótona creciente hasta rotura (por ejemplo en un mal diseño) o cuando aparecen cargas fluctuantes (fatiga). Aunque en muchos casos los tornillos pueden estar sometidos a múltiples tipos de fuerzas (torsión, flexión) siempre presentan una fuerte componente a tracción, condición de carga que ha sido estudiada en este trabajo.

La fatiga en tornillos suele caracterizarse a partir de las curvas de Wöhler, donde el aumento del factor R disminuye la vida en fatiga [1]. El cálculo del límite de fatiga es a menudo un factor condicionado por el

tiempo, pudiéndose medir en tiempos menores mediante un método acelerado usando la tensión umbral para la iniciación de fisuras por fatiga en el fondo del filete [2]. El fallo de tornillos ocurre hasta un determinado número de ciclos, a partir del cual no hay fractura [3].

Los tornillos de paso normal tienen una vida en fatiga mayor que los de paso fino, mostrando además el tornillo un efecto tamaño respecto a su vida en fatiga [4] (ésta disminuye con el aumento del diámetro nominal) debido al efecto entalla del fondo de los filetes [5]. El coeficiente de fricción en los hilos disminuye con el aumento de la velocidad del apriete y por tanto la carga en la unión roscada aumenta [6]. El nivel de precarga influye en la vida en fatiga de la unión: una precarga inicial insuficiente, o su pérdida, puede producir una reducción en la vida en fatiga del tornillo [1].

Los tornillos laminados mejoran el comportamiento en fatiga respecto a los mecanizados por arranque de material, debido a las tensiones residuales compresivas originadas en el fondo de los filetes [1,7]. Los factores que más influyen sobre el límite de fatiga de elementos roscados mecanizados son el desgaste de la herramienta y la velocidad de corte, mientras que el método de corte y el avance radial son menos significativos [8]. En los tornillos laminados las altas velocidades de penetración de la herramienta aumentan el límite de fatiga, debido a la aparición de mayores tensiones residuales axiales de compresión y al endurecimiento por deformación [9].

El laminado de los tornillos de acero después del recocido (comparándolo con el procedimiento contrario, que es lo usual) aumenta notablemente la vida en fatiga para tensiones mínimas bajas [10,11]. Por el contrario, para tensiones mínimas altas apenas hay cambios si los tornillos son de paso normal [10] y el aumento es mucho menor si los tornillos son de paso fino [11].

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Probeta de ensayo

Las probetas de estudio se realizaron mediante el roscado de un tornillo comercial M10x200 calidad 8.8 (DIN 931), de acero, pavonado y sin cabeza, en una pieza cilíndrica (con rosca interior mecanizada) de 16mm de diámetro, 150mm de longitud y del mismo material que el tornillo (figura 1).

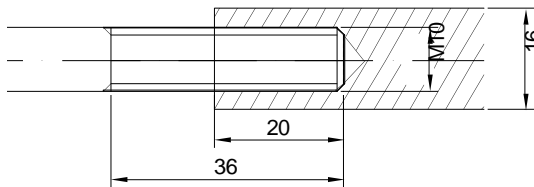


Figura 1. Unión roscada.

2.2. Procedimiento experimental

El comportamiento mecánico del acero de los tornillos se ha determinado a través de ensayos de tracción simple, con probetas obtenidas de la caña de los tornillos, usando una velocidad de desplazamiento de la mordaza de 2mm/min. También se han efectuado ensayos de microdureza Vickers.

Sobre las probetas con la unión roscada se han realizado ensayos con sollicitación monótona axial en control de desplazamiento (velocidad de movimiento de mordaza de 2mm/min), hasta rotura.

Para la caracterización en fatiga se realizaron ensayos en control de carga ($\Delta\sigma$ constante), con una forma de onda sinusoidal, frecuencia de 10Hz y diferentes valores del factor R (0, 0.25 y 0.50). Los ensayos se mantuvieron hasta rotura o hasta que se consiguieron 10^6 ciclos. Algunas de las probetas fueron sometidas a una precarga en tracción del 80% del límite elástico teórico

del material de los tornillos, para estudiar el efecto de la misma sobre la vida en fatiga.

3. RESULTADOS

3.1. Caracterización del material

El acero de estudio, después de su preparación metalográfica y ser atacado con nital al 4%, presentó una microestructura ferrítico-perlítica, como se puede observar en la figura 2.

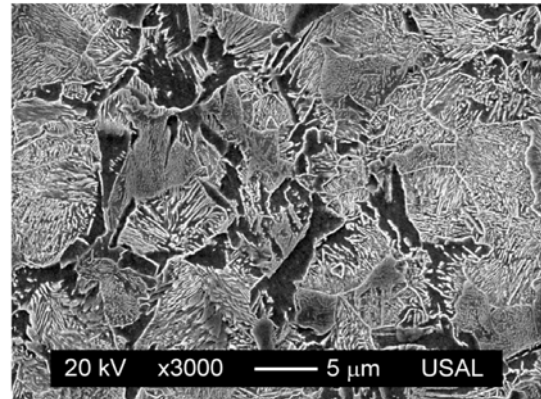


Figura 2. Microestructura del acero.

Se realizaron tres ensayos de tracción simple, cuyas curvas tensión-deformación se muestran en la figura 3. Las características mecánicas obtenidas fueron: módulo de Young $E=199\text{GPa}$, límite elástico convencional al 0.2% $\sigma_{0.2}=546\text{MPa}$, resistencia a tracción $\sigma_{\max}=715\text{MPa}$ y deformación para carga máxima $\epsilon_{\max}=0.04$. Los resultados alcanzados presentaron valores inferiores a los correspondientes a la calidad 8.8 de los tornillos.

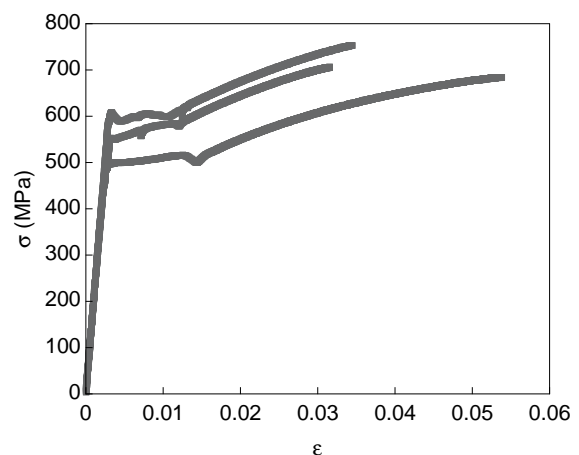


Figura 3. Curvas tensión-deformación (tracción simple).

La superficie de fractura resultante del ensayo de tracción simple (figura 4) es la típica fractura copa-cono presente en muchas aleaciones metálicas (dúctiles). Ésta presenta una zona central plana y fibrosa formada por microhuecos irregulares y una corona exterior con paredes a 45° de microhuecos alargados.

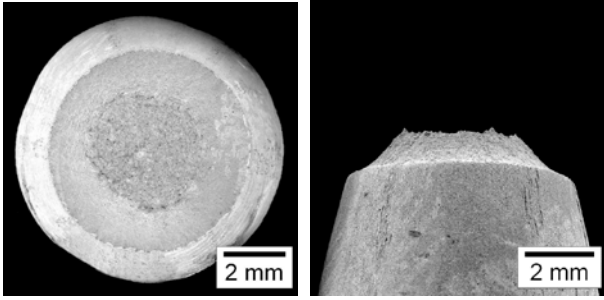


Figura 4. Superficie de fractura en tracción simple.

La microdureza Vickers se ha medido de forma radial sobre la sección longitudinal del tornillo (figura 5). Se obtuvieron valores mayores en la zona superficial que en la central, probablemente debido a una velocidad de enfriamiento diferente entre ambas regiones durante el tratamiento térmico posterior al proceso de conformado. Además, la microdureza obtenida presenta una gran dispersión en sus resultados, lo que sugiere la existencia de diferentes microestructuras.

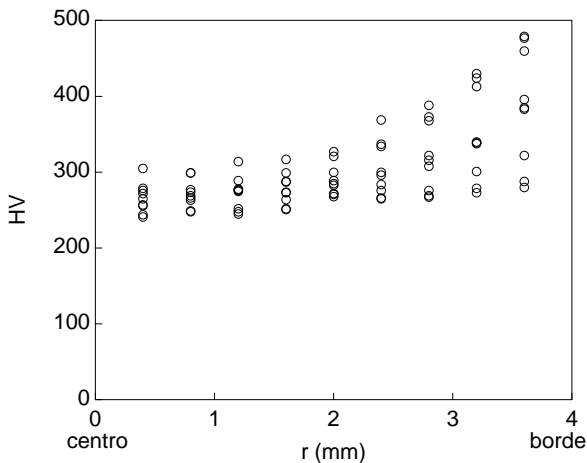


Figura 5. Microdureza Vickers.

3.2. Ensayos bajo sollicitación monótona creciente

Al aplicar sollicitación monótona creciente sobre las probetas con la unión roscada la fractura sucedió fuera de ésta. En las probetas donde no se introdujeron varios filetes del tornillo en la unión, la fractura tuvo lugar en el fondo de alguno de estos filetes exteriores y la tensión de rotura coincidió con el límite elástico del material. En cambio, si todos los filetes estaban dentro de la unión (todos habían sido roscados), la rotura sucedía fuera de ésta (en la caña del tornillo o en el enlace con la rosca) a una tensión superior al límite elástico del material.

La superficie de fractura resultado de los ensayos es de tipo copa-cono, con la particularidad de la presencia de los filetes que originan una superficie de fractura más asimétrica, donde además hay que salvar la altura de un filete (figura 6). En dicha superficie apareció la zona fibrosa, de menor tamaño que en tracción simple (respecto a la superficie total de fractura), y la corona exterior con forma más irregular.

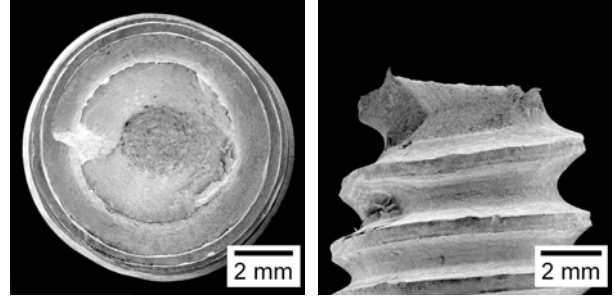


Figura 6. Superficie de fractura en carga monótona.

3.3. Ensayos de fatiga

Factor R

Se han obtenido las curvas de Wöhler ($\sigma_{\max}-N_f$ y $\Delta\sigma-N_f$) para probetas con unión roscada sometidas a carga cíclica, para $\Delta\sigma$ constante y varios valores del factor R (0, 0.25 y 0.50). Éstas se muestran en las figuras 7 y 8.

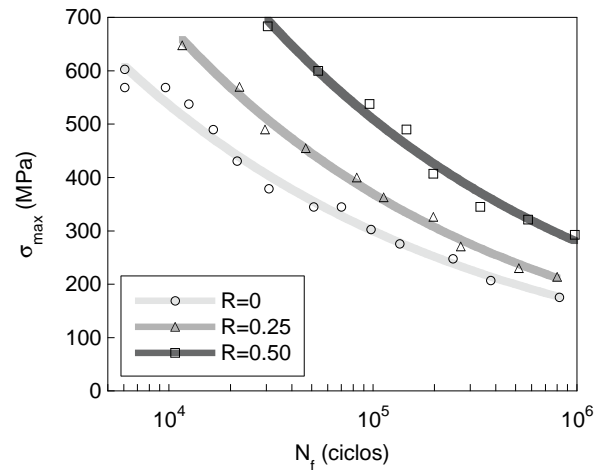


Figura 7. Curvas de Wöhler ($\sigma_{\max}-N_f$).

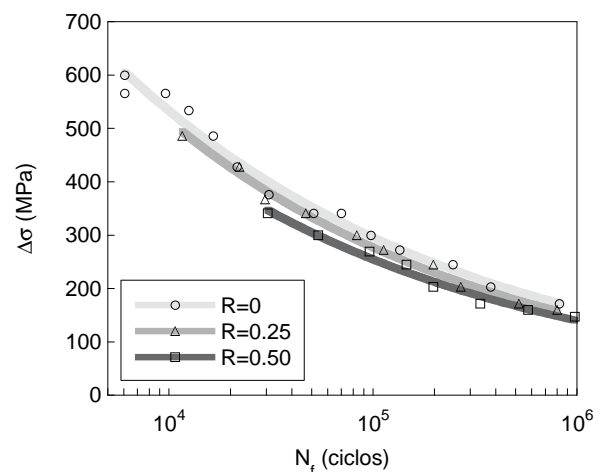


Figura 8. Curvas de Wöhler ($\Delta\sigma-N_f$).

Puede observarse que las curvas $\sigma_{\max}-N_f$ se desplazan hacia la derecha con el aumento del factor R , mientras que las curvas $\Delta\sigma-N_f$ lo hacen hacia la izquierda. Por tanto la fatiga es un fenómeno biparamétrico, donde el

aumento de σ_{\max} o de $\Delta\sigma$ disminuye la vida en fatiga. Además se ha obtenido un ajuste de tipo potencial para la vida en fatiga, único para todas las curvas, que tiene en cuenta ambos parámetros,

$$N_f = 2.82 \cdot 10^{14} \sigma_{\max}^{-1} \Delta\sigma^{-2.82} \quad (1)$$

Efecto de la precarga

En algunos ensayos los tornillos fueron sometidos a una precarga con el objeto de estudiar su efecto sobre la fatiga (figuras 9 y 10, donde el valor de la precarga se representa con una línea horizontal discontinua). Las curvas de Wöhler muestran que la vida en fatiga de los tornillos para $R=0$ y $R=0.50$ aumenta con la aplicación de la precarga para intervalos de oscilación de tensiones por debajo de ~ 220 MPa.

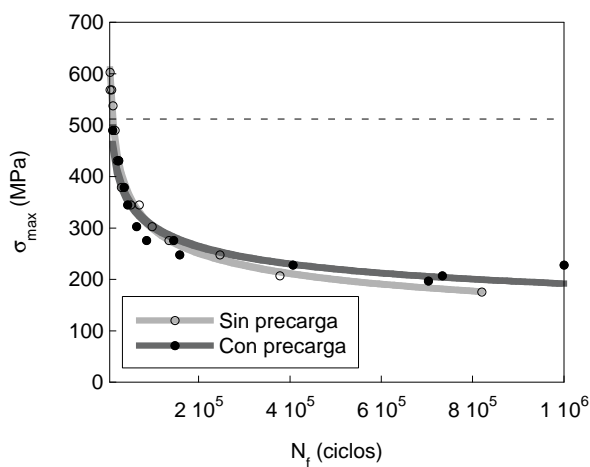


Figura 9. Curvas de Wöhler para $R=0$, con y sin precarga.

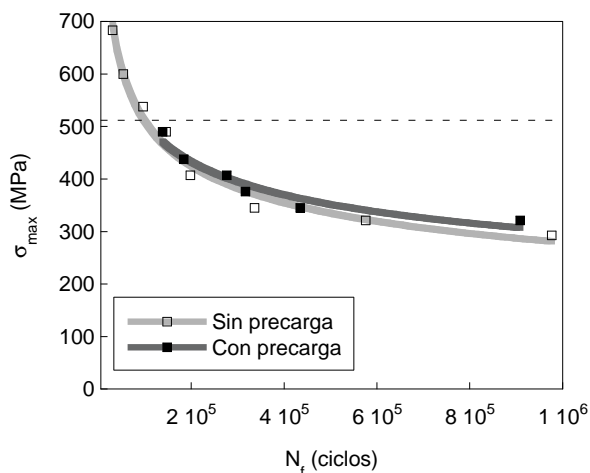


Figura 10. Curvas de Wöhler para $R=0.50$, con y sin precarga.

En tornillos libres de tensiones residuales, cómo los conformados por arranque de material, la precarga de tracción resulta siempre beneficiosa por las tensiones compresivas originadas en el fondo de los filetes. En cambio, en los tornillos conformados por deformación

plástica (después de realizar el tratamiento térmico) ya existen tensiones residuales producto del conformado que serán redistribuidas afectando a la vida en fatiga [1].

Superficies de fractura

La fractura por fatiga (figura 11) ocurre en el fondo del primer filete dentro de la unión roscada [3,4,10-12], donde existe la mayor tensión superficial. La superficie de fractura muestra una primera región fatigada, a continuación una zona con fractura plana y finalmente una fractura inclinada o labio cortante [10].

Las fisuras cortas (figura 11 superior), de poca profundidad, presentan un frente de fisura de fatiga en forma de “luna creciente” rodeando casi todo el borde del tornillo. Las fisuras intermedias (figura 11 media), de profundidades cercanas al centro del tornillo, tienen un frente de fisura aún de “luna creciente” pero con menos circunferencia cubierta. Por último, las fisuras largas (figura 11 inferior), de grandes profundidades, presentan un frente casi plano.

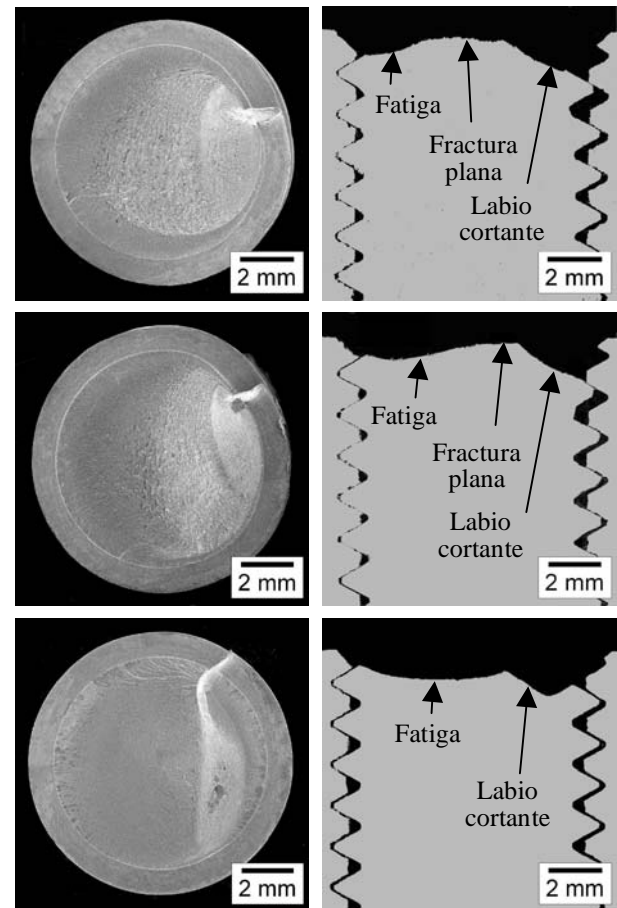


Figura 11. Superficie de fractura en fatiga.
(Superior) $\Delta\sigma=600\text{MPa}$, $R=0$ y $N_f=6056$ ciclos.
(Media) $\Delta\sigma=486\text{MPa}$, $R=0$ y $N_f=17850$ ciclos.
(Inferior) $\Delta\sigma=203\text{MPa}$, $R=0$ y $N_f=377911$ ciclos.

La tensión aplicada influye en el camino seguido por la fatiga, pero especialmente en su iniciación. Se realizó un ensayo de fatiga sin llegar a fracturar la probeta

(con $\Delta\sigma=486\text{MPa}$, $R=0$ y durante $0.75N_f$ ciclos) y a continuación se sometió ésta a una carga elevada para hacer más visible la fisura, ya que así se produce redondeo y aumento de la apertura de fisura (COD). En su corte longitudinal (figura 12) se observa cómo se inician fisuras en el fondo de filetes sucesivos, siendo la de mayor longitud la fisura del primer filete dentro de la unión, que es el más cargado, y así sucesivamente. Además, inicialmente las fisuras de fatiga se propagan desde el fondo del filete con cierta inclinación respecto la sección transversal del tornillo, de forma que el ángulo formado aumenta con la disminución de la carga aplicada (figura 11 derecha y figura 12), debido a la localización y a la direccionalidad de las tensiones principales máximas [13].

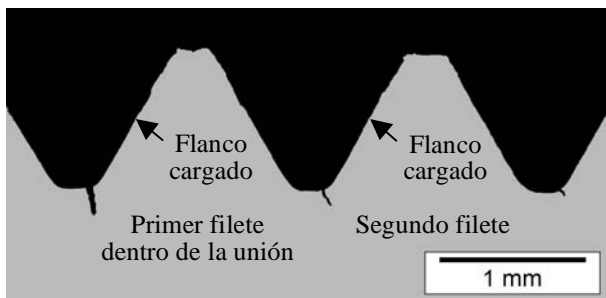


Figura 12. Iniciación de fisuras por fatiga.

Después de la superficie de fatiga aparece la fractura, cuando la fisura pasa a ser crítica. Ésta presenta una región casi plana cuyo tamaño disminuye con el aumento de la profundidad de fisura en fatiga, casi desapareciendo para $\Delta\sigma$ pequeñas (figura 11 inferior), y un labio dúctil que se corresponde con la fractura final donde se rompe longitudinalmente el filete. Ésta última región tiene en su perfil una inclinación de 45° hacia el flanco cargado del primer hilo.

En los cortes longitudinales de las probetas (figura 11 derecha) se muestra como apenas hay deformación plástica en la zona fatigada, donde existe un perfecto ajuste entre la rosca interior y la exterior. Mientras, en la parte fracturada inclinada (labio cortante) se observa, principalmente en la zona del primer filete dentro de la unión, un aumento de la deformación plástica conforme la tensión aplicada durante el ensayo es mayor.

La superficie de fractura por fatiga de los tornillos de acero está formada por microdesgarros dúctiles (figura 13), donde es posible observar estrías de fatiga que corresponden al crecimiento de la fisura en un ciclo de carga en el régimen de Paris [12,14]. En los aceros sometidos a tensiones máximas bajas, con gran parte de su superficie fatigada, se observan marcas de fatiga en el inicio de ésta sobre el borde de los tornillos, que muestran la dirección del avance de la fatiga (figura 14). El corte longitudinal de la probeta fatigada (sin llegar a la fractura total), después de revelar su microestructura (fractometalografía), muestra que el camino de fisura presenta frecuentes deflexiones y ramificaciones, lo que supone la existencia de un fuerte modo mixto local.

A continuación de la superficie de fatiga el mecanismo de fractura son los microhuecos (figura 15), apareciendo una zona intermedia entre ambas superficies donde se mezclan las dos fractografías.

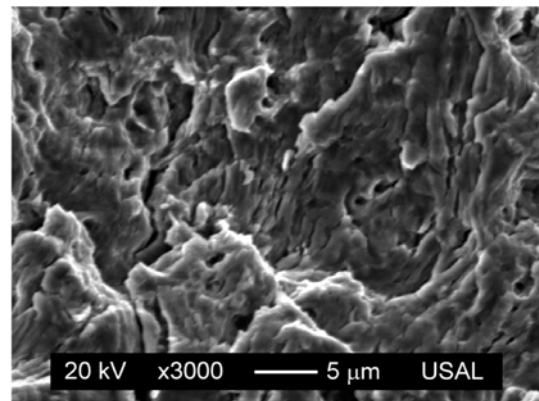


Figura 13. Microdesgarros dúctiles.

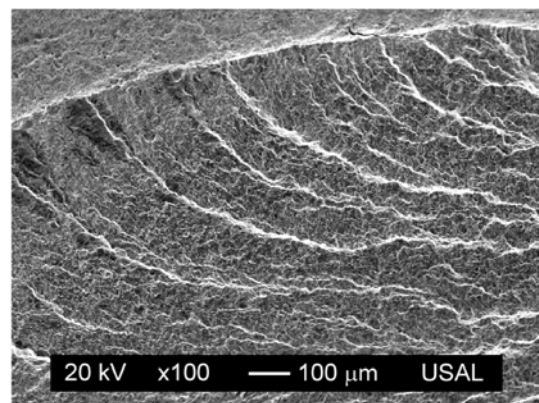


Figura 14. Marcas de fatiga en el borde del tornillo.

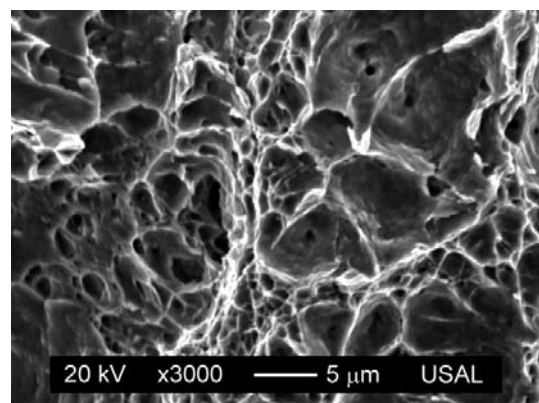


Figura 15. Microhuecos.

4. CONCLUSIONES

Con sollicitación monótona creciente la rotura de probetas con una unión roscada no sucede en dicha unión. Si el tornillo no ha sido completamente roscado la rotura se produce en el fondo de alguno de los filetes exteriores a la unión, con la tensión correspondiente al límite elástico del material.

En fatiga, la curva $\sigma_{\max}-N_f$ para probetas de acero con uniones roscadas se desplaza hacia la derecha con el aumento del factor R , mientras que la curva $\Delta\sigma-N_f$ lo hace hacia la izquierda. La fatiga es por tanto un fenómeno biparamétrico, donde el aumento de σ_{\max} o de $\Delta\sigma$ disminuye la vida en fatiga, pudiéndose efectuar un ajuste potencial único función de ambos parámetros.

La realización de una precarga de tracción (512MPa) previa a la carga cíclica, con factores $R=0$ y $R=0.50$, alarga la vida en fatiga de los tornillos para intervalos de oscilación de tensiones pequeños (~220MPa).

La superficie de fractura por fatiga es prácticamente plana y casi perpendicular al eje longitudinal del alambre. Para fisuras de poca profundidad el frente de fisura presenta forma de luna creciente que se prolonga por casi todo el borde del tornillo, para fisuras de profundidad intermedia la forma se mantiene pero con menor superficie exterior cubierta y para fisuras de gran profundidad el frente llega a ser casi recto.

La fractura por fatiga sucede en el fondo del flanco cargado correspondiente al primer filete dentro de la unión roscada, donde existe la mayor tensión superficial. La propagación inicial de la fisura de fatiga presenta cierta inclinación, con un ángulo que aumenta con la disminución de la tensión aplicada. Además, si la tensión aplicada es suficientemente alta pueden iniciarse fisuras en el fondo de varios filetes consecutivos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad de Salamanca (USAL) por la financiación concedida para el desarrollo del presente trabajo a través de la convocatoria para nuevas líneas de investigación a desarrollar por equipos propios de la Universidad (Proyecto USAL2008A09).

REFERENCIAS

- [1] Olsen, K.W., Rimnac, C.M., Ferrell, D.W., Garrett, C.E. Fatigue crack growth analyses of aerospace threaded fasteners, Part II: Material/stress state and bolt strength. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 3 (ASTM STP 1487), 2007, pp. 141-158. American Society for Testing and Materials, USA.
- [2] Raymond, L. Accelerated small specimen test method for measuring the fatigue strength in the failure analysis of fasteners. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 2 (ASTM STP 1391), 2000, pp. 192-203. American Society for Testing and Materials, USA.
- [3] Berger, C., Pyttel, B., Trossmann, T. (2006). Very high cycle fatigue tests with smooth and notched specimens and screws made of light metal alloys. Int. J. Fatigue 28, 1640-1646.
- [4] Majzoobi, G.H., Farrahi, G.H., Habibi, N. (2005). Experimental evaluation of the effect of thread pitch on fatigue life of bolts. Int. J. Fatigue 27, 189-196.
- [5] Kephart, A.R. Fatigue acceptance test limit criterion for larger-diameter rolled thread fasteners. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 2 (ASTM STP 1391), 2000, pp. 143-161. American Society for Testing and Materials, USA.
- [6] Oliver, M.P., Jain, V.K. Effect of tightening speed on thread and under-head coefficient of friction. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 3 (ASTM STP 1487), 2007, pp. 45-52. American Society for Testing and Materials, USA.
- [7] Ifergane, S., Eliaz, N., Stern, N., Kogan, E., Shemesh, G., Sheinkopf, H., Eliezer, D. (2001). The effect of manufacturing processes on the fatigue lifetime of aeronautical bolts. Eng. Fail. Anal. 8, 227-235.
- [8] Akyildiz, H.K., Livatyali, H. (2010). Effects of machining parameters on fatigue behavior of machined threaded test specimens. Mater. Des. 31, 1015-1022.
- [9] Kim, W., Kawai, K., Koyama, H., Miyazaki, D. (2007). Fatigue strength and residual stress of groove-rolled products. J. Mater. Process. Technol. 194, 46-51.
- [10] Stephens, R.I., Bradley, N.J., Horn, N.J., Arkema, J.M., Gradman, J.J. Influence of cold rolling threads before or after heat treatment on the fatigue resistance of high strength coarse thread bolts for multiple preload conditions. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 3 (ASTM STP 1487), 2007, pp. 29-41. American Society for Testing and Materials, USA.
- [11] Bradley, N.J., Stephens, R.I., Horn, N.J., Gradman, J.J., Arkema, J.M., Borgwardt, C.S. Influence of cold rolling threads before or after heat treatment on the fatigue resistance of high strength fine thread bolts for multiple preload conditions. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 3 (ASTM STP 1487), 2007, pp. 98-112. American Society for Testing and Materials, USA.
- [12] Olsen, K.W., Rimnac, C.M. Fatigue crack growth analyses of aerospace threaded fasteners, Part III: Experimental crack growth behavior. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 3 (ASTM STP 1487), 2007, pp. 17-28. American Society for Testing and Materials, USA.
- [13] Renauld, M.L., Lien, H., Wilkening, W.W. Probing the elastic-plastic, time dependent stress response of test fasteners using finite element analysis. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 3 (ASTM STP 1487), 2007, pp. 61-70. American Society for Testing and Materials, USA.
- [14] Gaudett, M., Tregoning, R., Focht, E., Zhang, X.J., Aylor, D. Laboratory techniques for service history estimations of high strength fastener failures. En: Structural Integrity of Fasteners Vol. 2 (ASTM STP 1391), 2000, pp. 16-35. American Society for Testing and Materials, USA.